

**UFRJ**

Luiz Fernando Araujo Oliveira

Método sísmico na bacia de Taubaté

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, Centro de Ciências da Matemática e da Natureza, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Especialista em Geofísica do Petróleo.

Orientadores:

Prof. Dr. Leonardo Borghi (UFRJ)

Prof. Dr. Webe Mansur (UFRJ)

M.Sc. Alvaro Gomes (PETROBRAS)

M

GL

048M

Rio de Janeiro
Dezembro de 2007



UFRJ

Luiz Fernando Amaral Oliveira

Método clássico na prática da Teoria

Trabalho de Conclusão de Curso em
Matemática e Física, apresentado
ao Curso de Graduação em Física,
Instituto de Física da Universidade
Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como
requisito necessário à obtenção do grau
de Bacharelado em Física do Instituto.

Orientadores

Prof. Dr. Roberto de Sá (UFRJ)
Prof. Dr. Roberto de Sá (UFRJ)
Prof. Dr. Roberto de Sá (UFRJ)

UFRJ Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza Biblioteca Central	
N.º REGISTRO	DATA
6888/12	03/01/2012
ORIGEM: Doação / UFRJ - Dep. de Geologia	

Luiz Fernando Araujo Oliveira

Método sísmico na bacia de Taubaté

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociência, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2007

Orientadores:

1. Geofísica. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental - Trabalho de Conclusão de Curso. I. Leonardo Borghi. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociência, Programa de Pós-Graduação em Geologia. III. Título.

Aprovada em 14 de maio de 2007

Por:

LUIZ Fernando Araujo Oliveira.

Método sísmico na bacia de Taubaté / Luiz Fernando Araujo Oliveira.-Rio de Janeiro: UFRJ/ IGeo, 2007.
xx, 103p.: il. ; 30cm.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociência, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2007

Orientadores: Leonardo Borghi, Webe Mansur

1. Geofísica. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental - Trabalho de Conclusão de Curso. I. Leonardo Borghi. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociência, Programa de Pós-Graduação em Geologia. III. Título.

Luiz Fernando Araujo Oliveira

Método sísmico na bacia de Taubaté

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, Centro de Ciências da Matemática e da Natureza, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Especialista em Geofísica do Petróleo.

Orientadores:

Prof. Dr. Leonardo Borghi (UFRJ)

Prof. Dr. Webe Mansur (UFRJ)

M.Sc. Alvaro Gomes (PETROBRAS)

Aprovada em: 28 de Dezembro de 2007

Por:

Prof. Prof. Dr. Leonardo Borghi

Prof. Prof. Dr. Webe Mansur

M.Sc. Alvaro Gomes

Rio de Janeiro
Dezembro de 2007

Agradecimentos

À Goda, minha esposa, por tudo o que ela fez por mim.

À minha família, especialmente aos meus pais, por tudo o que fizeram por mim.

À minha família, especialmente aos meus pais, por tudo o que fizeram por mim.

À minha família, especialmente aos meus pais, por tudo o que fizeram por mim.

À minha família,

À minha família, especialmente aos meus pais, por tudo o que fizeram por mim.

Para o velho chinês ...

Agradecimentos

Gostaria de decidir meus sinceros agradecimentos para:

Meus pais, pelo grande exemplo que sempre foram e sempre serão.

Ao meu irmão, grande companheiro de grandes batalhas travadas ao longo desta estrada chamada vida e involuntária testemunha ocular de grandes variações de humor.

À minha esposa por todo apoio e carinho fornecido ao longo destes anos.

Resumo

"Cuidado com o que você deseja."

O velho chinês

Resumo

OLIVEIRA, Luiz Fernando Araujo. **Método sísmico na bacia de Taubaté**. 2007. xx, 103p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociência, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Este trabalho tem como objetivo realizar uma breve introdução à aplicabilidade do método sísmico de reflexão. Para tal, o mesmo encontra-se dividido em três etapas, onde realiza-se, sequencialmente:

- Revisão sobre as características gerais de uma bacia sedimentar brasileira, neste caso, a bacia de Taubaté, pertencente ao Rift Continental do Sudeste Brasileiro.
- Apresentação dos aspectos teóricos pertinentes ao método sísmico de reflexão.
- Observação da associação dos tópicos anteriormente citados através de um estudo de caso.

Após a realização destas etapas, são tecidas as conclusões finais obtidas pelo autor.

List **Abstract** ras

OLIVEIRA, Luiz Fernando Araujo. **Método sísmico na bacia de Taubaté**. [Seismic method at Taubaté basin]. 2007. xx, 103p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociência, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

This work is focused to make a short introduction to seismic method. To achieve it's objective, this work was splitted into three stages:

- Review about general aspects of a Brazilian sedimentary basin. The Taubaté basin.
- Introduction to theoretical aspects of reflection seismic method.
- Analysis of a case history.

To complete these steps, some conclusions are obtained.

Lista de Figuras

1	Mapa de localização da bacia de taubaté. Retirado de Ribeiro (2004). . .	4
2	Coluna estratigráfica da bacia de taubaté. Retirado de Riccomini (1989).	6
3	Quadro estratigráfico proposto por Campanha (1994) comparando a estratigrafia genética estabelecida pela autora e a litoestratigrafia formal proposta por Riccomini (apud RIBEIRO, 2004).	7
4	Seção integrada proposta por Coimbra <i>et al.</i> (1983) para a estratigrafia da Formação Itaquaquecetuba.	11
5	Seção-tipo proposta para a Formação Pindamonhangaba. Retirado de Molinari (2003).	12
6	Mapa estrutural da bacia de Taubaté Molinari (2003).	13
7	Proposta de evolução tectônica para a bacia de Taubaté (RICCOMINI <i>et al.</i> , 1987 apud RIBEIRO, 2004).	19
8	Principais fontes de energia utilizadas na sísmica exploratória. Vibradores (A), explosivos (B) e Jatos de ar (C). Adaptado de http://www.lithprobe.ca , http://www.tdi-bi.com e http://www.austinpowder.com	32
9	Dispositivos de captação de sinais sísmicos. Hidrofones (A), Geofones de 1 componente (B) e Geofones de 3 componentes (C). Adaptado de http://www.lithprobe.ca , e http://www.geospacelp.com	34
10	Exibição de quatro CMPs distintos um sismograma marítimo típico. Adaptado de Yilmaz (2001).	42
11	Exibição da onda direta (A), Onda Refratada na primeira camada (B) e Onda refratada na segunda camada (C). Adaptado de Yilmaz (2001).	47
12	Exibição da onda direta (A), Reflexão primária (B) e Reflexão secundária (C) em um sismograma marítimo. Adaptado de Yilmaz (2001).	51
13	Exibição da onda direta (A), Onda Refratada (B) e Onda Rayleigh (C) em um sismograma terrestre. Adaptado de Yilmaz (2001).	53
14	Exemplo de falha normal encontrada na seção sísmica da linha sísmica 10. Retirado de Molinari (2003)	68
15	Exemplo de falha reversa encontrada na seção sísmica da linha sísmica 5. Retirado de Molinari (2003)	68
16	Exibição dos lineamentos de falhas que servem de delimitadores da bacia de Taubaté (amarelo) e a linha sísmica 7 (vermelho) que cruza estes linhamentos. Retirado de Molinari (2003)	69
17	Exemplo de falha-em-flor levantada em uma seção sísmica não interpretada. Retirado de Molinari (2003)	70

18	Referenciamento dos tempos duplos da bacia em relação ao embasamento interpretado. Retirado de Molinari (2003).	71
19	Fácies sísmica A. Retirado de Molinari (2003).	72
20	Fácies sísmica B. Retirado de Molinari (2003).	73
21	Fácies sísmica C. Retirado de Molinari (2003).	73
22	Fácies sísmica D. Retirado de Molinari (2003).	74
23	Fácies sísmica E. Retirado de Molinari (2003).	75
A.1	Seção sísmica processada e interpretada referente à linha sísmica 3. Retirado de Molinari (2003)	84
A.2	Seção sísmica processada e interpretada referente à linha sísmica 5. Retirado de Molinari (2003)	85
A.3	Seção sísmica processada e interpretada referente à linha sísmica 7. Retirado de Molinari (2003)	86
A.4	Seção sísmica processada e interpretada referente à linha sísmica 8. Retirado de Molinari (2003)	87
A.5	Seção sísmica processada e interpretada referente à linha sísmica 10. Retirado de Molinari (2003)	88

Lista de Tabelas

1	Tabela de classificação de rochas geradoras(folhelhos), em relação ao seu nível de COT.	23
2	Tipos de matéria orgânica em conjunto com seus possíveis ambientes deposicionais e a predisposição para geração de óleo.	23
3	Estimativa de óleo recuperável dos folhelhos pirobetuminosos do vale do Paraíba (ABREU, 1962).	28

Sumário

Agradecimentos	vi
Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 INTRODUÇÃO	1
2 A GEOLOGIA DA BACIA DE TAUBATÉ	3
2.1 Introdução	3
2.2 Histórico	4
2.3 Estratigrafia	5
2.3.1 FORMAÇÃO RESENDE	9
2.3.2 FORMAÇÃO TREMEMBÉ	9
2.3.3 FORMAÇÃO SÃO PAULO	10
2.3.4 FORMAÇÃO ITAQUAQUECETUBA	10
2.3.5 FORMAÇÃO PINDAMONHANGABA	11
2.4 Compartimentação Estrutural	12
2.4.1 ALTO DE CAÇAPAVA	13
2.4.2 ALTO DE PINDAMONHANGABA	14
2.4.3 ALTO DE GUARATINGUETÁ	14
2.4.4 SUB-BACIA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	15
2.4.5 SUB-BACIA QUIRIRIM	15
2.4.6 SUB-BACIA APARECIDA	15
2.4.7 SUB-BACIA LORENA	15
2.5 Sistemas Depositionais	15
2.5.1 SISTEMA DE LEQUES ALUVIAIS	16
2.5.2 SISTEMA LACUSTRE	16
2.5.3 SISTEMA FLUVIAL	17

2.6	Evolução tectono-sedimentar	17
2.7	Sistema Petrolífero	21
2.7.1	ROCHAS GERADORAS	22
2.7.2	ROCHAS DE SOBRECARGA	23
2.7.3	MIGRAÇÃO	24
2.7.4	ARMADILHA	24
2.7.5	ROCHA SELANTE	25
2.7.6	ROCHA-RESERVATÓRIO	25
2.7.7	SINCRONISMO	26
2.7.8	SISTEMA PETROLÍFERO DA BACIA DE TAUBATÉ	27
3	O MÉTODO SÍSMICO	29
3.1	Aquisição Sísmica	31
3.1.1	LEVANTAMENTO SÍSMICO 2D	37
3.1.2	LEVANTAMENTO SÍSMICO 3D	38
3.1.3	LEVANTAMENTO SÍSMICO 4D	39
3.1.4	ALGUNS COMENTÁRIOS SOBRE OS LEVANTAMENTOS 2D, 3D E 4D	40
3.2	Processamento Sísmico	41
3.2.1	ASPECTOS GERAIS DE UM SISMOGRAMA	44
3.2.1.1	Onda Direta	45
3.2.1.2	Onda Refratada	46
3.2.1.3	Reflexão primária	47
3.2.1.4	Fantasma associadas a fonte e receptores	48
3.2.1.5	Reflexões secundárias e Reverberações	49
3.2.1.6	Ondas Rayleigh e Love	50
3.2.1.7	Onda aérea	53
3.2.1.8	Difração	53
3.2.2	ETAPAS DO PROCESSAMENTO SÍSMICO	54
3.2.2.1	Pré-processamento	55
3.2.2.2	Deconvolução do sinal	56
3.2.2.3	Análise de velocidades	57
3.2.2.4	Correção de NMO	57
3.2.2.5	Correção de DMO	58
3.2.2.6	Procedimentos que intermediam a nova correção de NMO	59

3.2.2.7	Eliminação de múltiplas	59
3.2.2.8	Empilhamento.....	61
3.2.2.9	Migração	62
4	ESTUDO DE CASO	66
4.1	Análise Sismoestrutural	66
4.1.1	IDENTIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE FALHAS	67
4.1.1.1	Sistema de falhas ENE a NO-SE	69
4.1.1.2	Sistema de falhas NNE-SSO	69
4.1.1.3	Sistema de falhas NNO-SSE	70
4.1.2	COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL	70
4.2	Análise Sismoestratigráfica	71
4.2.1	FÁCIES SÍSMICA A.....	72
4.2.2	FÁCIES SÍSMICA B.....	72
4.2.3	FÁCIES SÍSMICA C.....	73
4.2.4	FÁCIES SÍSMICA D.....	73
4.2.5	FÁCIES SÍSMICA E.....	75
	Apêndices	83
	A DADOS REAIS	83

1 INTRODUÇÃO

A correlação entre a demanda de recursos energéticos e o grau de desenvolvimento se encontra estabelecida com um grau de clareza consideravelmente alto. Também se encontra claro que a manutenção de uma nação em um determinado grau de desenvolvimento, ou o alavancar da mesma para um patamar superior, se encontra baseada no atendimento das demandas referentes à energia, dentre um conjunto que contempla diversas outras necessidades que abarcam os mais diversos campos estratégicos.

Partindo-se desta premissa, e associando a mesma aos fatos de que, atualmente, o petróleo abarca uma fatia considerável das fontes energéticas disponíveis em uso, assim como o fato de que o grau de complexidade da execução da atividade de geofísica de petróleo, em todos os contextos, apresenta uma taxa crescente, pode-se facilmente constatar que existe uma natural e instantânea necessidade de profissionais que possuam uma formação mais robusta, para que os mesmos enfrentem, com um grau de agilidade similar ou maior de que seus precessores, os desafios que se colocam atualmente nesta área do conhecimento que deve ser considerado como uma ciência de fronteira.

De maneira concordante com as premissas previamente apontadas, esta monografia, que faz parte de uma dos requisitos necessários para a obtenção do título de especialista em geofísica do petróleo, em conjunto com o curso de formação de geofísicos do petróleo da PETROBRAS, visa contemplar a aplicação do método sísmico de reflexão na bacia sedimentar de Taubaté.

Embora, em termos clássicos, muitos fatores, que serão expostos no capítulo 2, apontem para a incapacidade da bacia sustentar um sistema petrolífero, esta bacia

se apresenta como um interessante instrumento para o estudo dos conceitos de geologia, uma vez que a mesma pode ser considerada como um dos mais belos exemplos de bacias do tipo rifte localizadas em território nacional.

No capítulo 3, uma discussão sucinta, não focalizada no desenvolvimento matemático, sobre aspectos teóricos do método sísmico de reflexão é realizada, com o intuito de apontar generalidades do contexto exploratório.

Finalmente, no capítulo 4, o amalgama dos capítulos anteriores é realizado ao se contemplar um estudo realizado sobre o conteúdo das informações obtidas através de levantamentos sísmicos na bacia em questão.

Posteriormente, este trabalho se encerra com um conjunto de conclusões levantadas pelo autor, construídas a elaboração do mesmo.

2 A GEOLOGIA DA BACIA DE TAUBATÉ

2.1 Introdução

Localizada no nordeste do estado de São Paulo, entre as cidades de Queluz e São Paulo, a bacia de Taubaté (Figura 1) é considerada por muitos autores como um bom exemplo de bacia tipo rifte. Esta bacia é parte integrante de um conjunto de bacias que se formaram durante o processo de ruptura do Supercontinente Pangea, que resultou na separação dos continentes Sul-americano e Africano através do surgimento da porção sul do Oceano Atlântico. Este conjunto de bacias rifte recebeu de Almeida (1976) a denominação inicial de **Sistemas de Rifts da Serra do Mar¹ (SRSM)**. Posteriormente, este conjunto fora renomeado como **O Rifte Continental do Sudeste Brasileiro (RCSB)** por Riccomini (1989). A sedimentação desta bacia é de origem continental, onde pode-se caracterizar depósitos de leques aluviais e planícies fluviais. Também são elementos característicos da bacia, a presença de depósitos pelíticos, típicos de ambientes lacustres, com presença de fósseis de ambiente continental.

A forma da bacia de Taubaté pode ser sutilmente aproximada por um meio elipsóide, onde a sua secção longitudinal se encontra orientada no eixo WSW-ENE, se estendendo por aproximadamente 170 km, a sua largura varia entre 10 e 25 km e profundidade máxima de 840 m, ocupando assim uma área total de aproximadamente 2400 km², englobando a porção proximal da bacia do Rio Paraíba do Sul. A compartimentação estrutural da bacia já foi objeto de estudo de diversos autores e será o escopo da seção 2.4.

Os principais acessos à bacia de Taubaté são através das rodovias dos Tra-

¹Sistema que une a formação das bacias de Curitiba, São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda ao mesmo processo, ocorrido durante o Mesozóico-Cenozóico

balhadores (SP-70) e Presidente Dutra (BR-116 ou SP-60 no trecho que se encontra no estado de São Paulo) e todas as vias que destas se originam para servir as cidades que se encontram no litoral paulista e as serras vizinhas. O acesso também é possível via malha ferroviária, através da Estrada de Ferro Central do Brasil (EFCB), que liga as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo.

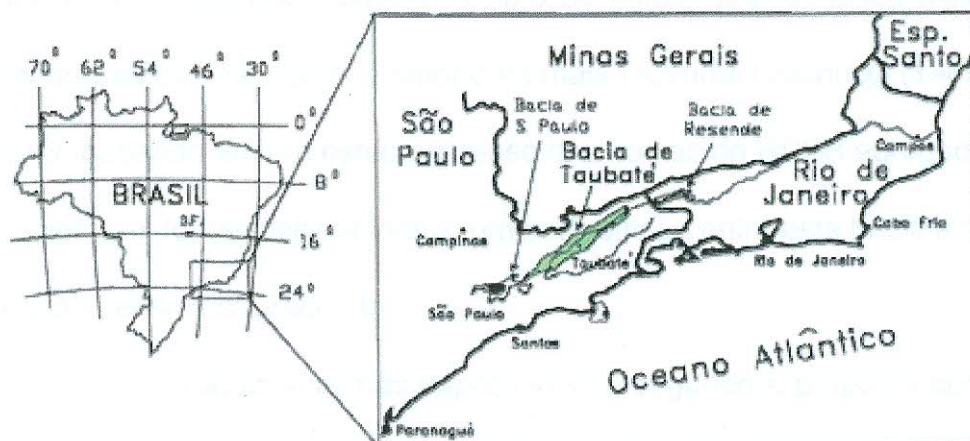


Figura 1: Mapa de localização da bacia de Taubaté. Retirado de Ribeiro (2004).

2.2 Histórico

A bacia de Taubaté tem sido alvo de estudos de natureza diversa, uma vez que apresenta características geológicas e estruturais peculiares. A presença de recursos naturais, não metálicos, associadas a sua localização sobre o eixo Rio-São Paulo, região de crescimento econômico e populacional, servem como elementos balizadores para a focalização dos estudos na região.

A presença de folhelho pirobetumoso, lastreou diversos estudos econômicos que remontam os tempos de Monteiro Lobato e a primeira indústria de petróleo brasileira, e apontando para a implantação de uma usina de retrotagem no município de Tremembé, na década de 50, para se verificar o potencial do sistema petrolífero da bacia. A discussão sobre o sistema petrolífero desta bacia é escopo da seção 2.7.

2.3 Estratigrafia

Segundo Molinari (2003), existem diversas propostas de quadros estratigráficos para a bacia de Taubaté, onde em cada uma das mesmas a quantidade de sistemas deposicionais da bacia é distinta. A proposta apresentada por Riccomini (1989), tornou-se a mais aceita para esta bacia devido ao fato de contemplar os cinco sistemas deposicionais presentes nos modelos anteriores mais recentes (Vespucchi (1985)), assim como propor, baseado em um estudo extenso das bacias do RCSB agregado ao conceito de fácies e sistemas deposicionais, uma correlação entre esta bacia e as demais pertinentes ao sistema supracitado.

Os cinco principais sistemas deposicionais, segundo a proposta apresentada por Riccomini, da bacia de Taubaté são:

1. Sistemas de leques aluviais associados à planícies de rios entrelaçados na Formação Resende.
2. Sistema lacustre na Formação Tremembé.
3. Sistema fluvial meandrante na Formação São Paulo, na parte sul da bacia de Taubaté.
4. Sistema fluvial entrelaçado da Formação Itaquaquecetuba.
5. Sistema fluvial meandrante da Formação Pindamonhangaba, na porção central da bacia de Taubaté.

Cabe ressaltar que estes não são os únicos de depósitos registrados. Existem outros depósitos de origem pleistocênica e holocênica na parte superior da bacia. O quadro litroestratigráfico referente à proposta apresentada por Riccomini se encontra apresentada na Figura 2.

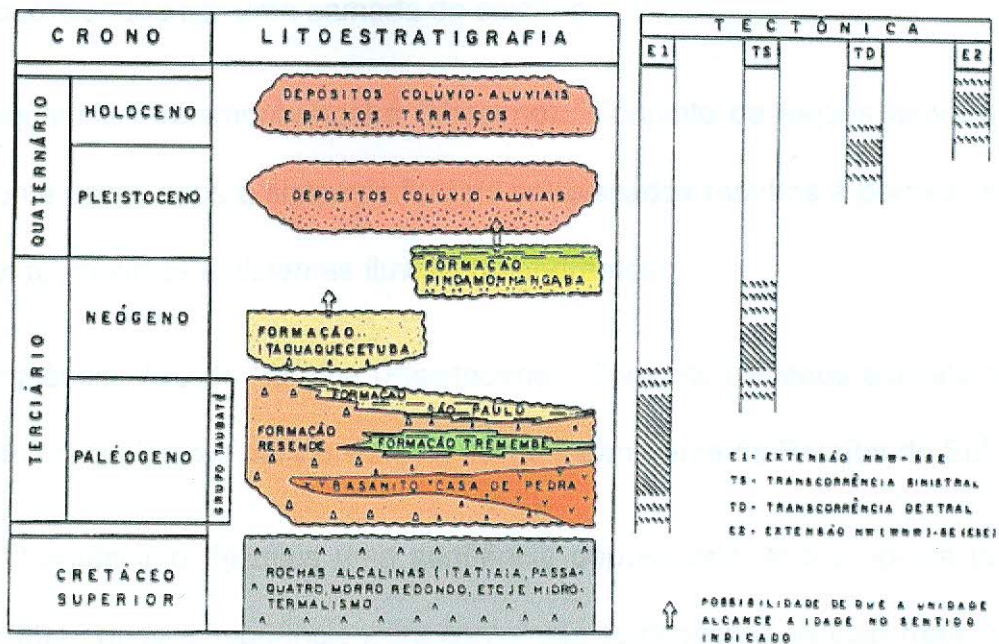


Figura 2: Coluna estratigráfica da bacia de taubaté. Retirado de Riccomini (1989).

Posteriormente à proposta de Riccomini (1989), pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) realizaram uma nova análise dos sedimentos em 1990, com o intuito de se obter uma avaliação do preenchimento da bacia segundo o ponto de vista da Estratigrafia de Sequências, que contempla a união da litoestratigrafia com a bioestratigrafia. A análise do conteúdo fóssilífero, oriunda da bioestratigrafia, associada à litoestratigrafia permite uma nova visão sobre as possíveis correlações temporais entre sistemas deposicionais distintos. Esta nova análise resultou em uma nova divisão da bacia. Tal divisão contempla quatro sequências deposicionais, a saber:

1. Seqüência Tremembé (Paleógeno): Caracterizada por leques aluviais oligocênicos nas fronteiras da bacia. Esses leques apresentam uma gradação lateral para sistemas fluviais entrelaçados e meandrantos, com desembocadura em um sistema lacustre.
2. Seqüência Taubaté (Oligoceno Superior): Conjunto de sistemas litoestratigraficamente iguais aos da Seqüência Tremembé, no entanto existe uma separação

proporcionada por uma camada de calcário.

3. Seqüência Pindamonhangaba (Mioceno): Conjunto de leques aluviais lateralmente associados à sistemas fluviais entrelaçados restritos à porção central da bacia, próximos a sistemas fluviais meandantes.
4. Seqüência Vale do Paraíba (Pleistoceno): Conjunto de leque aluviais que passam gradualmente para o sistema fluvial meandrante do Paraíba do Sul.

O acréscimo de mais uma seqüência deposicional fora proposta por Campanha (1994), onde a seqüência extra contempla os depósitos aluviais mais recentes. Uma comparação entre esta proposta e o quadro apresentado por Riccomini é realizada na Figura 3.

As propostas de divisão estratigráficas estruturadas em seqüências encontram problemas no que tange às bases conceituais, quando aplicadas à bacia de Taubaté, devido ao fato da bacia ser inteiramente continental, e consequentemente sua sedimentação se encontrar teoricamente isenta das influências das variações relativas do nível do mar. Por conta deste motivo, a descrição dos sistemas deposicionais da bacia será norteadada pela estrutura formal proposta por Riccomini (1989).

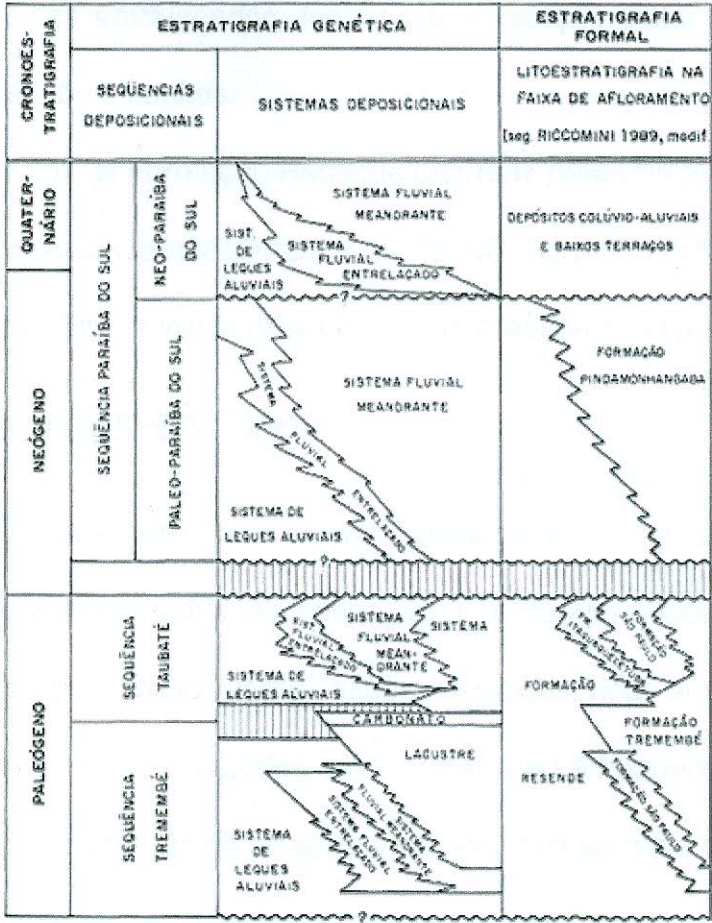


Figura 3: Quadro estratigráfico proposto por Campanha (1994) comparando a estatigrafia genética estabelecida pela autora e a litoestratigrafia formal proposta por Riccomini (apud RIBEIRO, 2004).

2.3.1 FORMAÇÃO RESENDE

Denominada inicialmente por Amador (1975), esta fora renomeada diversas vezes, sendo renomeada por Carneiro *et al.* (1976) como Formação Caçapava e por Vespucci (1984) como Formação Jacareí.

Ao localizar esta formação no Grupo Taubaté, apresentado por Riccomini (1989), percebe-se que a mesma apresenta uma correspondência à porção basal do grupo supracitado.

O paleoambiente associado aos sedimentos da Formação Resende apresenta relacionado a leques aluviais, localizados na porção proximal e constituídos por conglomerados polimíticos penetrados por arenitos e lamitos arenosos, conectadas à

planície aluvial de rios entrelaçados, localizada na porção distal e constituída pela intercalação de arenitos e lamitos.

Os sedimentos da Formação Resende ocorrem, predominantemente, ao longo da borda norte das bacias que fazem parte do RSCB. Segundo estudos palinológicos de Lima e Amador (1985), a idade desta formação é eocênica-oligocênica.

2.3.2 FORMAÇÃO TREMEMBÉ

Interdigitando-se lateral e verticalmente aos depósitos da Formação Resende, a Formação Tremembé, cuja denominação, consagrada na literatura, fora dada por Almeida (1955), é constituída por argilitos verdes escuros maciços, ricos em matéria orgânica, onde o conteúdo fossilífero (ostracodes e restos de aves) é freqüente. Também fazem parte da constituição a alternância na estratificação plano-paralela de folhelhos castanho-escuros e margas e a ocorrência de folhelhos laminados, localmente papiráceos, fossilíferos (restos de peixes) e pirobetuminosos Riccomini (1989) assim como arenitos médios a grossos, mal selecionados, com estratificação cruzada.

Inserida no Grupo Taubaté e apresentando concordâncias nos limites estratigráficos das formações Resende e São Paulo nas porções inferior e superior respectivamente, a Formação Tremembé tem seus sedimentos restritos somente à bacia de Taubaté e associam-se os mesmos a um paleoambiente deposicional lacustre oligoncênico do tipo *playa-lake*.

2.3.3 FORMAÇÃO SÃO PAULO

Completando o Grupo Tremembé de Riccomini (1989), a Formação São Paulo apresenta correspondência à parte superior do grupo citado. Sua constituição é de arenitos grossos, com aspecto conglomerático em localizações pontuais. Os arenitos desta formação são depositados em uma estratificação do tipo *fining-up* até siltitos e argilitos

de maneira cruzada, sob portes variados. A ocorrência de conteúdo fossilífero nos siltitos e argilitos é ocasional, podendo constituir depósitos de restos vegetais. As fácies sedimentares desta formação são características de um sistema fluvial meandrante. Sua ocorrência dentro da bacia de Taubaté fica restrita à porção sudoeste, embora hajam registros dessa formação nas bacias de São Paulo e Resende. A deposição da formação ocorreu durante o Oligoceno.

2.3.4 FORMAÇÃO ITAQUAQUECETUBA

A Formação Itaquaquetuba encontra-se estratigraficamente entre o Grupo Taubaté, separado por uma discordância erosiva, e as planícies atuais dos rios Pinheiros e Tietê. Datações radiométricas de troncos de fósseis encontrados nos sedimentos da formação indicam uma idade de um pouco maior que 50 ka.

O paleoambiente associado à formação é fluvial entrelaçado, sob condições de aridez climática. Os sedimentos foram definidos por Coimbra *et al.* (1983) como arenitos grossos, mal selecionados, com grãos angulosos a subarredondados e pouca matriz siltico-argilosa, com estratificações cruzadas planares e tangenciais de porte médio. A ocorrência desta formação está restrita à bacia de São Paulo e ao sudoeste da bacia de Taubaté. Como esta formação não apresenta uma seção-tipo, por conta das constantes lavras para a extração de areia, foi proposta uma seção integrada (Figura 4).

2.3.5 FORMAÇÃO PINDAMONHANGABA

Assim como a Formação Itaquaquetuba, a Formação Pindamonhangaba tem seus sedimentos de idade pleistocência e se distingue do grupo Taubaté através de uma discordância erosiva. A parte superior da bacia apresenta também uma discordância erosiva dos depósitos colúvio-aluviais quaternários da bacia.

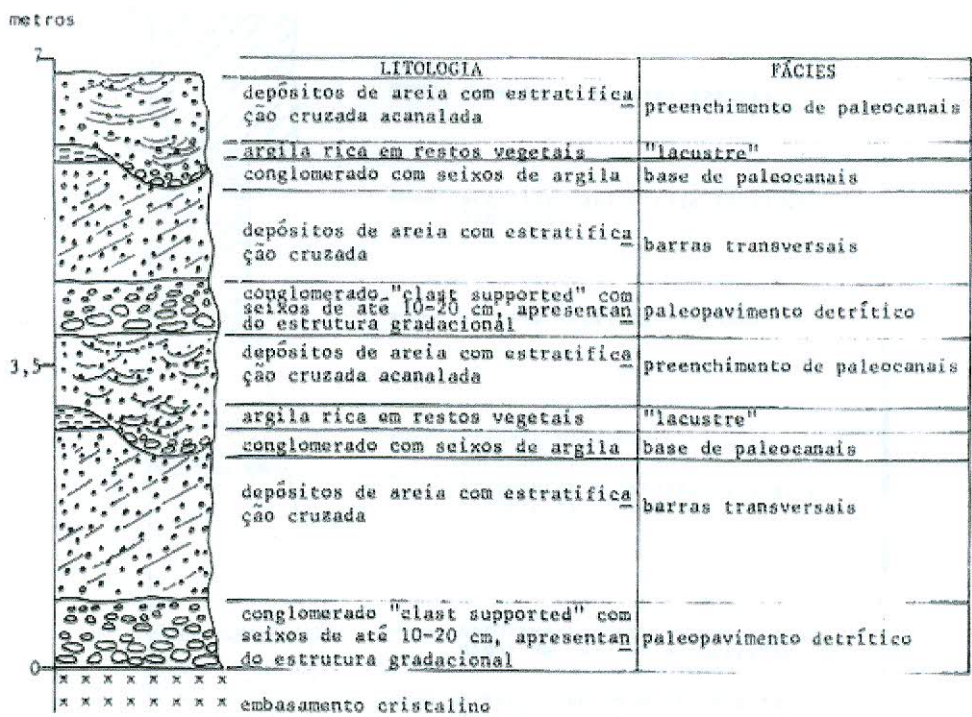


Figura 4: Seção integrada proposta por Coimbra *et al.* (1983) para a estratigrafia da Formação Itaquaquetuba.

Atribui-se à esta formação um sistema deposicional fluvial meandrante Riccomini (1989), onde os sedimentos apresentam variação de tamanhos de grãos do tipo *fining-up*, partindo de areitos conglomeráticos com matriz argilosa na base atingindo siltitos e argilitos no topo. Existe a ocorrência de deposição de matéria orgânica vegetal nesta formação, através de pequenas deposições de linhitos. Uma proposta para a seção tipo desta formação encontra-se disponível na Figura 5.

A localização desta formação se encontra restrita à porção central da bacia, mais especificamente entre as cidades de Caçapava e Pindamonhangaba, no estado de São Paulo.

2.4 Compartimentação Estrutural

Ao longo do tempo, diversos autores investiram muito tempo estudando o arcabouço estrutural desta bacia através da análise de dados gravimétricos assim como dados

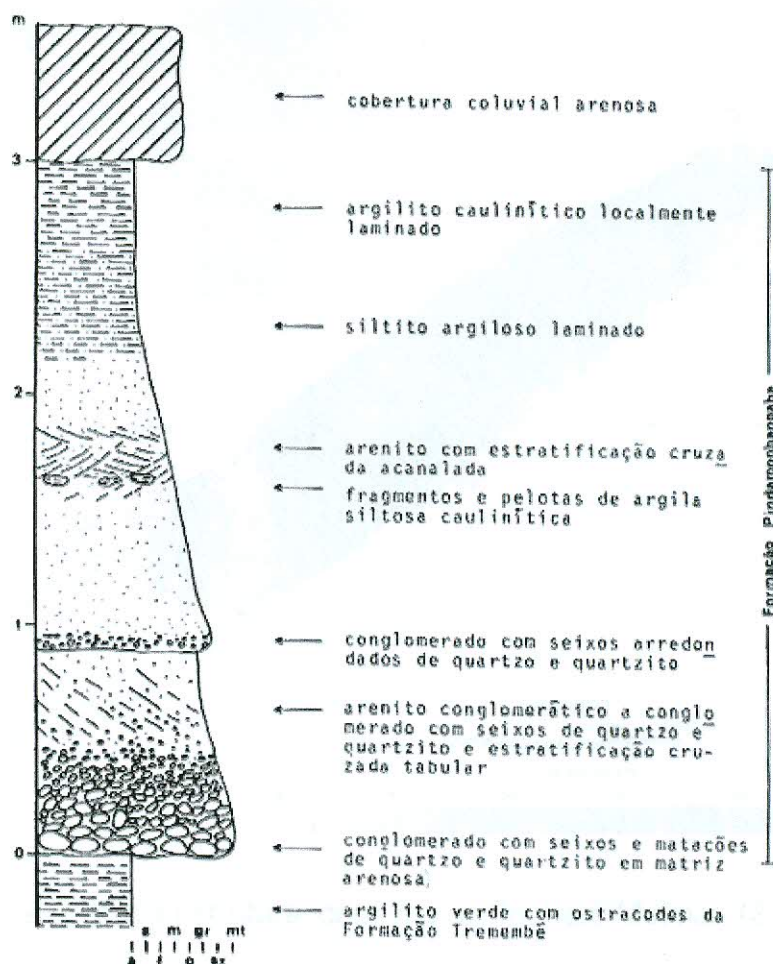


Figura 5: Seção-tipo proposta para a Formação Pindamonhangaba. Retirado de Molinari (2003).

obtidos através de sísmica de reflexão. Embora muita energia tenha sido empregada nestes estudos, os resultados com relação a estrutura se apresentavam, em sua maioria, conflitantes. Tais conflitos passam pelo número de depocentros encontrados na bacia até problemas nos demais termos e nomenclatura. A compartimentação apresentada nesta monografia será a proposta por Molinari (2003), uma vez que seu trabalho, no tocante desta temática, vislumbrou a uniformização da nomenclatura dos componentes do arcabouço, através da análise de dados provenientes da sísmica de reflexão, propondo a existência de três altos estruturais que servem de elementos segregadores das quatro sub-bacias que estão contidas na bacia de Taubaté.

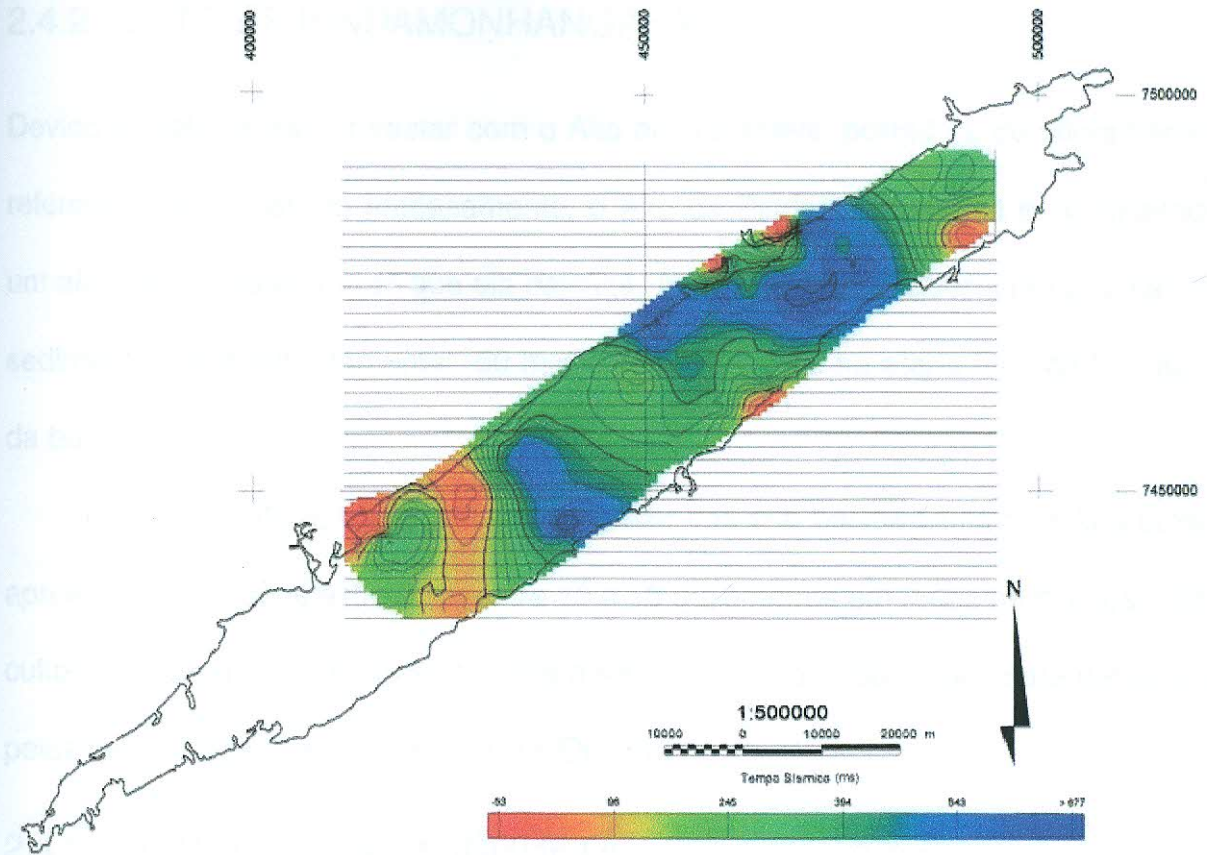


Figura 6: Mapa estrutural da bacia de Taubaté Molinari (2003).

2.4.1 ALTO DE CAÇAPAVA

Feição estrutural positiva, reponsável pela exposição do embasamento no centro da bacia. Este alto serve como elemento separador das sub-bacias de São José dos Campos e Quiririm, localizado ao Norte da cidade de Caçapava. A manutenção da estrutura ocorreu durante toda a evolução sedimentar da bacia, o que pode ser constatado através do afinamento das camadas sedimentares observadas pelas sísmicas feitas em direção da estrutura (Fernandes (1993)).

O Alto de Caçapava apresenta uma forma elipsoidal cujo semi-eixo maior é de aproximadamente 4.5 quilômetros, orientado sobre o eixo NE, e o semi-eixo menor de 2.75 quilômetros. Esta feição, segundo Fernandes (1993), é de fácil individualização, devido a presença de um sistemas de falhas (Jacareí, Quiririm e Bom Retiro) que apresentam fácil associação à estrutura.

2.4.2 ALTO DE PINDAMONHANGABA

Devido ao fato de se contrastar com o Alto de Caçapava, portadora de afloramentos referentes às rochas do embasamento, o Alto de Pindamonhangaba é considerado um alto relativo às estruturas que ela delimita. Esta estrutura foi coberta por pacotes de sedimentos (aproximadamente 150 metros), em especial na etapa final da formação da bacia.

Esta estrutura, que serve como divisor das sub-bacias Quiririm e Aparecida, apresenta dimensões estimadas entre 10 e 13 quilômetros em todas as direções, dificultando a orientação da mesma sobre a rosa dos ventos. Ela se encontra delimitada pelas falhas de Piedade, Bom Retiro e Quiririm.

2.4.3 ALTO DE GUARATINGUETÁ

Feição estrutural responsável pela separação da sub-bacia de Aparecida da sub-bacia de Lorena. Apresenta a maior declividade em direção a sub-bacia de Aparecida. Esta estrutura encontra-se delimitada pelas falhas do Ronco e de Aparecida.

2.4.4 SUB-BACIA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Portadora de uma espessura sedimentar de aproximadamente 300 metros (Fernandes (1993)), esta sub-bacia encontra-se condicionada pelos falhamentos SO-NE, segundo Marques (1990), apresentando basculamento na direção nordeste.

2.4.5 SUB-BACIA QUIRIRIM

Graben assimétrico que apresenta basculamento para Sudeste, contrariando as demais sub-bacias. Seus limites estruturais são o Alto de Caçapava e o Alto de Pindamonhangaba. Esta estrutura, segundo Marques (1990), apresenta uma espessura sedimentar de 780 m.

2.4.6 SUB-BACIA APARECIDA

Maior sub-bacia, tanto em termos de área quanto de espessura sedimentar (atinge aproximadamente 850 m, segundo Marques (1990)). Apresenta basculamento para Noroeste. Sua limitação estrutural é realizada pelos altos de Pindamonhangaba, à Sudeste, e pelo Alto de Guaratinguetá, à Nordeste.

2.4.7 SUB-BACIA LORENA

Sub-bacia de espessura sedimentar de até 430 m Molinari (2003). Apresenta leve basculamento para Noroeste. Sua limitação estrutural é o Alto de Guaratinguetá à Sudoeste.

2.5 Sistemas Deposicionais

Os sistemas deposicionais da bacia de Taubaté já foram extensamente discutidos por diversos autores, conforme mencionando na seção 2.3. Mantendo conformidade com o que fora declarado previamente, a discussão dos sistemas deposicionais da bacia de Taubaté será lastreada pela estruturação apresentada por Riccomini (1989), no entanto completamente apoiada nos sistemas deposicionais apresentados por Molinari (2003), que vislumbra uma abrangência ligeiramente mais ampla, arquitetando toda a deposição da bacia sobre três sistemas, agrupando diversas fácies sedimentares similares que ocorreram em contextos estratigráficos diferentes em uma mesma classe de sistema deposicional. Estas classes de sistemas deposicionais são as seguintes:

- Sistemas de leques aluviais;
- Sistemas lacustres;
- Sistemas fluviais, que serão subdivididos em entrelaçado e meandrante.

2.5.1 SISTEMA DE LEQUES ALUVIAIS

Sistema deposicional cuja constituição é de brechas e conglomerados de diversas litologias. Apresenta gradação normal e inversa, com geometria de acunhamento em direção ao centro da bacia. Ao se direcionar para o centro, o sistema grada para sistemas fluviais. Este sistema pode ser encontrado nas bordas Norte e Sul da bacia. Embora haja uma aparente simetria na localização dos sistemas, o mesmo não ocorre com o dimensionamento dos mesmos. O sistema que ocorre na borda sul apresenta depósitos que se estendem por até 3.5 km da falha de borda, em direção do centro da bacia, constataando-se com uma extensão deposicional 3 vezes menor da borda norte.

2.5.2 SISTEMA LACUSTRE

A constituição do sistema lacustre da bacia de Taubaté pode ser descrita por ritmos de folhelhos e margas, níveis de solidificação calcíferas e argilas esverdeadas e fossilíferas (Riccomini *et al.* (1987), Riccomini (1989)).

As condições de deposição dos folhelhos, segundo evidências geoquímicas, em comparação às argilas esverdeadas é de anoxia de fundo de lago Riccomini (1989). Já as solidificações calcíferas se devem à episódios de hipersalinidade do paleolago.

Freitas e Appi (1987) fazem uma correspondência das fases de salinidade a um nível de paleossolo com fendas de ressecção, o que caracteriza um marco estratigráfico para as bacias de Resende e Taubaté.

2.5.3 SISTEMA FLUVIAL

Sistema constituído por arcósios e quartzo-arenitos grossos a médios com estratificações cruzadas, acanalada e planar. Frequentemente encontram-se níveis centimétricos de conglomerados com seixos arredondados (canais) e a presença de lamitos representando os depósitos de abandono de canal (Riccomini *et al.* (1987)).

Os depósitos de areia média a grossos com níveis conglomeráticos apresentam uma deposição do tipo *fining-up*, o que representa depósitos de canais meandrantes. Encontra-se com frequência depósitos referentes ao rompimento de diques marginais e lentes de argilitos dos meandros abandonados.

A deposição de arenitos grossos, conglomeráticos, que apresentam algumas lentes de argilas estão correlacionados ao sistema fluvial entrelaçado que se encontra na bacia(Coimbra *et al.* (1983)).

2.6 Evolução tectono-sedimentar

Em conformidade com o que fora escrito na parte introdutória deste trabalho, a bacia de Taubaté se apresenta com um belo exemplo de bacia do tipo rifte, portadora de uma forma do tipo hemi-gráben e apresentando sedimentação exclusivamente continental. Esta bacia, de origem cenozóica, em conjunto com o Sistema de Rifts da Serra do Mar, se apresentam como um dos resultados subseqüentes do conjunto de eventos complexos, impulsionados pela reativação das feições do embasamento, que se apresenta oriundo do processo de rifteamento que propiciou a formação do Oceano Atlântico Sul, durante o Jurássico.

Segundo dados gravimétricos (Fernandes (1993)), a espessura dos sedimentos que preenchem a bacia é de aproximadamente 850 metros, apontando para idades desde o Eoceno até o Recente.

Embora existam modelos diferentes para a proposição do preenchimento da bacia (Fernandes (1993), Chang *et al.* (1989), Riccomini (1989), Appi *et al.* (1986), Riccomini *et al.* (1987)), trata-se como unanimidade o fato da deposição da bacia ser sin-tectônica e ocorrer durante o Paleógeno.

O modelo evolutivo para a bacia de taubaté, segundo Riccomini *et al.* (1987), contempla três fases, que foram discutidas de maneira indireta na seção 2.5. A primeira fase (Fase I) está representada pela deposição de leques aluviais e lamitos arenosos, associados à abertura do rifte que ocorrera com maior intensidade na porção Norte da bacia, embora haja ocorrências na porção central da bacia. A segunda fase (Fase II) está associada à instalação de um sistema lacustre que apresentou expansão até um determinado máximo transgressivo, caracterizado pelas camadas de folhelhos betuminosos que se apresentam na região. Também existe a ocorrência de inunditos e argilitos nas bordas do lago, derivados dos sistemas fluviais instalados nestas regiões, caracterizando um ambiente do tipo *playa-lake*. Posteriormente a este evento, um grande evento de ressecção pôde ser observado na região através de uma camada de calcário associada à gretas de ressecamento. A terceira fase do sistema (Fase III) caracteriza-se pela formação de um sistema fluvial meandrante, responsável pelo assoreamento da bacia, que se apresenta até os dias de hoje.

O modelo tectono-sedimentar apresentado por Riccomini (1989), contempla que a região passou por um processo tectônico distensivo entre o Eoceno e o Oligoceno. Esta distensão, orientada no sentido NNW-SSE se deveu em função do basculamento termo-mecânico ocorrido na bacia de Santos, apresentando como resultado o desenvolvimento de um grande gráben orientado no sentido ENE, mergulhante para NNW. A depressão supracitada permitiu a acumulação dos primeiros registros sedimentares, pertinentes aos depósitos de leques aluviais associados a rios entrelaçados

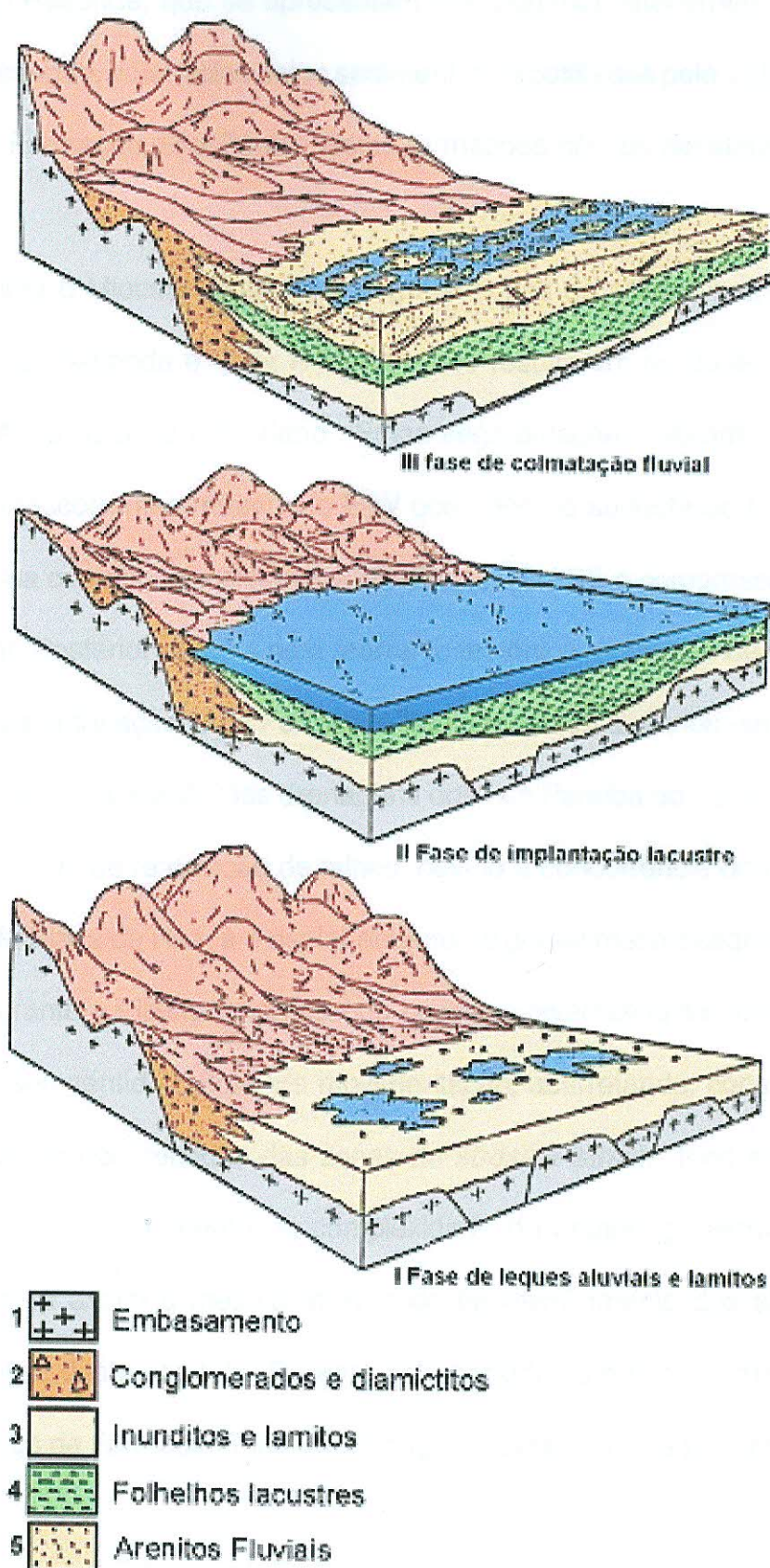


Figura 7: Proposta de evolução tectônica para a bacia de Taubaté (RICCOMINI *et al.*, 1987 apud RIBEIRO, 2004).

da Formação Resende, que se apresentam interdigitados lateralmente aos lagos da Formação Resende, soterrados pelos sedimentos depositados pelo sistema fluvial meandrante da Formação São Paulo. Estas formações são os constituintes do Grupo Taubaté.

Durante o Mioceno ocorreram segmentações do gráben nas bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda, que resultaram no desenvolvimento das soleiras de Arujá, Queluz e Floriano. Estas segmentações tiveram início nas movimentações transcorrentes no sentido E-W ocorridos no sudeste do Brasil, o que alimentavam uma componente distensiva na direção NW-SE e compressivas na direção perpendicular. Posteriormente a este rearranjo tectônico, ocorreu o depósito dos sedimentos fluviais entrelaçados da Formação Itaquaquecetuba. Atribui-se à formação da soleira de Arujá a separação das drenagens dos rios Paraíba do Sul e Tietê.

Processos de reativação de falhas, devido a concorrência dos fenômenos de subducção da Placa de Nazca e esplachamento da dorsal meso-oceânica do Atlântico, ocorreram durante o Pleistoceno, fazendo com que diversas falhas transcorrentes invertessem o seu sentido natural de movimentação, acarretando, conseqüentemente, em uma inversão nos sentidos das zonas de *stress* e *strain*. Todo este mecanismo fora essencial para o aumento da complexidade do arcabouço estrutural da bacia, segmentando-se assim a mesma através do desenvolvimento dos altos estruturais citados no início deste capítulo. Durante este período, também ocorrera a deposição dos sedimentos da Formação Pindamonhangaba, caracterizada por um sistema fluvial meandrante.

Após o processo de reativação supracitado, a bacia de Taubaté retomou um processo tectônico distensivo, direcionado sobre o eixo WNW-ESE, durante o Quaternário. Durante este período, os sedimentos colúvio-alúvias do rio Paraíba do Sul

foram depositados.

Existem discordâncias entre as interpretações sobre a evolução tectôno-sedimentar da bacia. Marques (1990) e Fernandes (1993), utilizando linhas sísmicas, discordam do modelo apresentando por Ricommini. Maiores detalhes sobre as diferenças podem ser encontradas em Ribeiro (2004).

2.7 Sistema Petrolífero

A discussão que será apresentada encontra-se com melhor detalhamento no trabalho de Milani *et al.* (2000). Este trabalho vislumbra a construção de um panorama sobre a exploração de petróleo na margem continental brasileira, assim como perspectivas. Embora a maior parte do texto enfoque a exploração em águas profundas, a discussão sobre os sistemas petrolíferos é de caráter universal.

O conceito de sistema petrolífero, introduzido por Magoon e Dow (2004), visa o entendimento da existência e funcionamento vários elementos e fenômenos necessários para geração e armazenamento de óleo e/ou gás. Basicamente, um sistema petrolífero pode ser caracterizado por cinco elementos (rochas geradoras, rochas reservatório, rochas selantes, rochas de sobrecarga e rochas carreadoras) e três fenômenos (migração, trapeamento e sincronismo). Ao longo da discussão que se encontra a seguir, o leitor perceberá que alguns dos elementos se encontram, eventualmente, aclopados à um determinado tipo de rocha.

2.7.1 ROCHAS GERADORAS

Dentre os elementos constituintes de um sistema petrolífero, a rocha geradora é o elemento fundamental. Isto se deve ao fato de que no caso de ausência de rochas geradoras, é impossível para a natureza encontrar um mecanismo equivalente que

possa suprimir esta falta.

As rochas geradoras são responsáveis pela ocorrência, tipo, quantidade e qualidade do óleo. Estas são, em sua essência, constituídas de matéria orgânica. No entanto, o fato da rocha ser portadora de materia orgânica não consiste em uma condição necessária e suficiente para a mesma se tornar uma rocha geradora. Para tal é necessário que outras condições sejam observadas. Uma delas é a capacidade de manutenção da matéria orgânica, pois se uma rocha potencialmente geradora se encontrar depositada em um ambiente rico em oxigênio, os mecanismos de oxidação serão responsáveis pela redução das riquezas de Hidrogênio e Carbono da rocha, e sendo assim, por conseguinte, reduzindo a sua matéria orgância. Sob este aspecto, uma rocha pode ser considerada geradora de hidrocarbonetos quando apresenta teores de Carbono Orgânico Total (COT) superiores a 1%, embora estas rochas apresentem, normalmente, teores em torno de 2% e 8%. Não são incomuns valores que atinjam 14%, sendo raras as concentrações até 24%. De uma maneira geral, as rochas geradoras podem ser classificadas pelo seu nível de COT, em conformidade com a tabela 2.7.1. Cabe ressaltar que no máximo 50% da matéria orgânica depositada em uma rocha geradora se transforma em hidrocarbonetos.

Tabela 1: Tabela de classificação de rochas geradoras(folhelhos), em relação ao seu nível de COT.

COT	Classificação
menos que 1%	Fraco
1%	Mínimo aceitável
entre 1% e 3%	Médio
Mais que 3%	Alto

A matéria orgânica depositada em uma rocha geradora, pode ser subdividida em três grandes grupos, que estão correlacionados com os tipos de hidrocarbonetos

que podem ser gerados. Encontram-se listados na tabela 2.7.1 as possibilidades citadas.

Tabela 2: Tipos de matéria orgânica em conjunto com seus possíveis ambientes deposicionais e a predisposição para geração de óleo.

Tipo	Ambiente	Potencial
I	lacustre e marinho	alto para óleo e baixo para gás
II	marinho ou misto	médio para óleo e gás
III	continental	baixo para óleo e alto para gás

2.7.2 ROCHAS DE SOBRECARGA

Outra condição para a produção de hidrocarbonetos se encontra apoiada na evolução térmica da rocha geradora. Para a geração de óleo, existe a necessidade de soterramento da rocha geradora. Este processo é realizado pelas rochas de sobrecarga, que podem apresentar litologia diversa. Ao se soterrar a rocha geradora, configura-se naturalmente um estado de temperatura e pressão diferenciado. Em condições normais de pressão, uma rocha geradora inicia a produção de óleo em temperaturas próximas de 60°C. O óleo gerado nesta janela de temperatura é viscoso e de baixa maturidade. Ao se aumentar a temperatura, o óleo resultante se torna cada vez mais fluido até o topo de geração de óleo que se localiza em temperaturas em torno de 90°C. Ao se aumentar a temperatura, o óleo gerado se torna cada vez mais fluido, devido a uma presença cada vez maior de gás dissolvido. A coexistência entre gás e óleo perdura até os 120°C. A partir deste valor, somente gás é gerado.

2.7.3 MIGRAÇÃO

A rocha geradora, após a produção de óleo, tende a passar por um processo intenso de fraturamento devido ao aumento da pressão interna. Esta ruptura permite

que o material produzido se espalhe em busca de locais onde a pressão litoestática seja menor. Normalmente, os fluidos se deslocarão para camadas superiores em busca destas regiões de menor pressão. O processo de deslocamento desses fluidos, através das diversas rotas possíveis até uma região de armazenamento, constitui o fenômeno de migração.

As rotas de migração a serem utilizadas podem apresentar naturezas distintas, partindo-se de fraturas de escalas diversas, passando por falhas com diversas possibilidades de rejeito e espaçamento, ou fluindo através de rochas de porosidade elevada, denominadas rochas carreadoras.

2.7.4 ARMADILHA

O processo de armadilha contempla a focalização e o aprisionamento do fluido em uma determinada camada, não permitindo o escape futuro, forçando com que a acumulação ocorra nesta região. De uma maneira geral, existem mecanismos de armadilha distintos: A armadilha estrutural e a armadilha estratigráfica.

A armadilha estrutural tem o processo de focalização definido pela configuração geométrica das estruturas das rochas. O grau de complexidade da armadilha estrutural apresenta caráter diverso, podendo ser simplesmente uma lateral de um domo de sal ou folhelho ou de uma dobra homoclinal. As armadilhas estruturais mais comuns são os ápices de dobras anticlinais ou domos salinos, embora a ocorrência de estruturas complexas como superposição de dobras e falhas é possível.

Eventualmente, o processo de migração dos hidrocarbonetos pode ser cessado devido ao acunhamento da camada que está realizando o transporte, assim como o bloqueio da mesma por uma barreira de permeabilidade ou diagenética. Quando isto ocorre, dá-se início da acumulação de hidrocarbonetos em posições estruturais

não notáveis. As armadilhas que seguem este padrão são conhecidas como armadilhas estratigráficas.

2.7.5 ROCHA SELANTE

Depois de ser atraído para o interior da armadilha, os hidrocarbonetos devem encontrar uma determinada situação que não permita que o seu fluxo siga à frente. Nesta situação, o fluido deve se encontrar no interior de uma rocha-reservatório, e os limites desta devem ser determinados por rochas selantes.

Geralmente, as rochas selantes possuem granulometria fina (folhelhos, calcilitos, siltitos), embora qualquer rocha possa servir como rocha selante, desde que possua uma permeabilidade muito baixa em relação à rocha-reservatório (evaporitos, rochas ígneas intrusivas). Uma rocha reservatório pode possuir, em seu âmago, rochas selantes devido a mudanças faciológicas ou diagenéticas.

2.7.6 ROCHA-RESERVATÓRIO

Em uma visão simplista, qualquer rocha que apresente algum espaço, ou seja, qualquer valor de porosidade, pode vir a servir como rocha-reservatório. No entanto, casos extremos, possíveis a partir da visão simplista, como rochas ígneas ou rochas metamórficas cristalinas fraturadas se apresentariam, na maioria dos casos, como péssimos reservatórios de hidrocarbonetos. Sendo assim, um outro fator, além do espaço disponível, se torna muito importante na caracterização da potencialidade de uma rocha reservatório: A permeabilidade. Uma rocha que possua uma permeabilidade maior do que outra se apresentará como melhor reservatório, devido ao fato da interconexão entre os poros permitir a maximização do volume de óleo que poderá ser escoado pela rocha. Normalmente as rochas reservatório apresentam litologia composta por material detrítico, com granulometria variando entre fração areia e seixo.

Estas litologias se apresentam como representantes de sistemas deposicionais antigos, de alta energia. As rochas-reservatório mais comuns são arenitos que foram depositados em dunas, rios, praias, deltas, planícies litorâneas e em mares e lagos profundos. Posteriormente aos arenitos, os reservatórios mais comuns são as rochas calcárias porosas, que possuem sistemas deposicionais variados.

Quando uma rocha reservatório é contemplada, o grau de seleção dos sedimentos que fazem parte de sua composição devem ser levados em conta, uma vez uma rocha mal selecionada, naturalmente, irá apresentar sedimentos de granulometria variada, fazendo-se com que os espaços disponíveis sejam preenchidos por sedimentos de dimensionalidade menor, afetando a permeabilidade e a porosidade da rocha. Sendo assim, um sistema que apresente uma maturidade textural elevada é o melhor candidato possível para uma rocha reservatório.

As rochas-reservatório apresentam, normalmente, porosidade entre 5% e 35%, embora os valores se concentrem na faixa entre 15% e 35%. Cabe ressaltar que as rochas-reservatório podem apresentar o caráter de rocha carreadora, desde que tenha uma permeabilidade razoável e não esteja conectada à uma trapa ou rocha selante.

2.7.7 SINCRONISMO

O sincronismo é o fenômeno responsável pelo alinhamento espaço-temporal adequado da ocorrência da rocha geradora, migração, armadilha, rocha-reservatório e rocha selante em um determinado sistema petrolífero. Como fora dito anteriormente, a rocha geradora necessita de soterramento para que a mesma entre na janela de produção de hidrocarbonetos, no entanto, nada disto adianta se as rotas de migração não estiverem disponíveis. Tampouco terão serventia as rotas de migração no caso de a rocha reservatório não ter sido depositada enquanto a rocha geradora estava em

plena produção.

Note que o sincronismo se apresenta como outro fenômeno fundamental para a constituição de um sistema petrolífero, uma vez que sem ele, a existência de extensas deposições de rochas reservatório, de maneira defasada em relação às rochas geradoras não fazem o mínimo sentido.

Segundo Milani *et al.* (2000) a falta de sincronismo tem sido a parcela majoritária dos motivos causadores do insucesso de perfurações exploratórias em escala global.

2.7.8 SISTEMA PETROLÍFERO DA BACIA DE TAUBATÉ

A bacia de Taubaté apresenta folhelhos verde-escuros pertencentes à Formação Tremembé, que são ricos em matéria orgânica (COT maior que 14%, segundo Abreu (1962)) assim como potenciais reservatórios (Arenitos das formações Resende, São Paulo e Itaquaquetuba). O fato da rocha potencialmente geradora da Formação Tremembé ser aflorante em uma parte bacia sugere que os sistemas petrolíferos especulativos Tremembé-Resende(?) e Tremembé-São Paulo(?) são muito jovens, devido ao fato de não existir deposição de rochas de sobrecarga, que se apresenta como o principal elemento faltante para que estes sistemas especulativos se tornem possíveis, uma vez que necessitam de uma maturação térmica adequada. Outro elemento faltante nestes sistemas especulativos são as armadilhas, tanto no contexto estratigráfico e estrutural.

Embora a extração de petróleo a partir da exploração das rochas reservatórios se demonstre inviável, devido a falha do sistema petrolífero, conforme apresentado anteriormente, a lavra das rochas da Formação Tremembé se apresenta como uma alternativa para a produção de óleo, uma vez que estes folhelhos são pirobetuminosos

e o aquecimento dos mesmos à temperaturas elevadas propicia a produção de óleo, que apresenta maior instabilidade química dos seus componentes, no entanto pode se apresentar como solução dependendo do contexto econômico em que a lavra for realizada.

Segundo Abreu (1962), as destilações de folhelho se iniciaram na bacia de Taubaté em 1881 para se produzir gás de iluminação e óleo. Em 1897 as atividades foram terminadas, embora a bacia passara por dois momentos em que fora contemplada a retomada das atividades. O primeiro deles durante a Primeira Guerra Mundial quando se produziu gasolina e óleo. O segundo momento, na década de 50, foi quando a CNP iniciou estudos para a instalação de uma usina de retortagem desses folhelhos.

Estima-se que a quantidade de óleo recuperável no vale do Paraíba, segundo Abreu (1962), é de aproximadamente 4 bilhões de barris, conforme a tabela 2.7.8. Como pode-se perceber, os volumes são expressivos, no entanto, a exploração se apresenta economicamente inviável no momento.

Tabela 3: Estimativa de óleo recuperável dos folhelhos pirobetuminosos do vale do Paraíba (ABREU, 1962).

Área	Volume aproximado (Mbbl)
Taubaté-Pindamonhangaba	980
Taubaté-Quiririm e Pindamonhangaba-Roseira	973
Quiririm-Roseira	1953

3 O MÉTODO SÍSMICO

Ao se contemplar o cenário atual, o método sísmico desponta como a técnica mais importante para o estudo em subsuperfície. Isto pode ser corroborado com a quantidade de geofísicos envolvidos com este método. A alta acurácia, o alto poder de penetração e a alta resolução são os principais aspectos que fortalecem o posicionamento deste método no cerne das atividades exploratórias da geofísica. O método vem sendo utilizado em larga escala pela indústria petrolífera, de maneira apreciável em outras frentes, como a busca de lençóis freáticos e levantamentos da posição do embasamento para grandes obras de engenharia civil e em uma escala muito menor, no entanto ainda considerável, na mineração.

Embora em termos de técnicas aplicadas ao registro dos dados, os métodos sísmicos de terremotos e o sísmico exploratório se apresentem iguais, o método sísmico exploratório se apresenta como uma variante da sismologia de terremotos, uma vez que a última se apresenta como uma atividade passiva, que contempla o registro do fraturamento das rochas que compõem as estruturas mais internas da Terra, de magnitude e localização determinadas pela natureza, por um ou mais conjuntos de aparelhos espalhados por todo planeta. A sísmica exploratória, em contrapartida, contempla a geração de pequenos terremotos através do controle dos elementos geradores dos mesmos. Outro aspecto contrastante é a escala de distância entre fonte e os receptores. No método sísmico exploratório, esse parâmetro é muito menor que na sísmica de terremotos.

Como pode ser notado, o mecanismo-base para o método sísmico exploratório está estruturado na geração e detecção de ondas. O intervalo de tempo transcorrido

entre estes dois elementos associado a uma estimativa de velocidades em subsuperfície são os itens que permitem a modelagem dos raios que descrevem a trajetória descrita por um ponto que se localize em uma das frentes de onda durante todo o seu trajeto entre fonte e receptor. As informações de subsuperfícies estarão codificadas nas características desses raios, que poderão ser categorizados em duas grandes famílias: os raios refratados e os raios refletidos. As características físicas de cada uma das rochas em subsuperfície serão responsáveis pelas alterações que se apresentarão nos sinais registrados, tanto para as ondas refletidas quanto as refratadas.

Em uma visão macroscópica, o método sísmico pode ser dividido em três estruturas fundamentais, a saber:

1. Aquisição Sísmica: Etapa que engloba o planejamento e execução do levantamento dos dados sísmicos em alguma região de interesse geológico/geofísico.
2. Processamento Sísmico: Contempla o tratamento de dados das informações colhidas, reduzindo ou eliminando efeitos indesejáveis que apresentam natureza diversa.
3. Interpretação Sísmica: Aborda a análise dos dados tratados com o intuito de se identificar e localizar estruturas que sejam interessantes para a atividade, neste caso, reservatórios com hidrocarbonetos.

Aspectos gerais das estruturas supracitadas, elementos teóricos, assim como discussões sucintas sobre as atuais fronteiras deste ramo serão discutidos ao longo desse capítulo. Em sua essência, esta discussão será apoiada nos textos apresentados por Yilmaz (2001), Telford, Geldart e Sherif (1990) e Rosa (2007). Pode-se encontrar nos textos citados todo o arcabouço teórico, em conjunto com o ferramental matemático, necessário para a compreensão detalhada do método. O texto deste

capítulo se encontra-se focado no método sísmico de reflexão, embora historicamente o método sísmico de refração tenha ocupado uma região de apreciável destaque e atualmente ainda seja utilizado com considerável magnitude em outros segmentos da indústria, este método possui, no momento, uma função uma relevância reduzida para o segmento que esta discussão se destina, cabendo somente as devidas menções que forem necessárias ao longo do texto que segue.

3.1 Aquisição Sísmica

Como fora dito anteriormente, o planejamento e a execução do levantamento de dados na região de interesse geológico são tarefas cuja responsabilidade recai sobre a aquisição sísmica. O planejamento da execução de um levantamento sísmico se inicia com a estimativa da profundidade dos objetivos, que se dá através da aglutinação das informações sobre a geologia da região. De posse das estimativas das profundidades dos objetivos, tem-se início a vinculação de alguns parâmetros do levantamento sísmico. O levantamento sísmico pode ser classificado em duas famílias, balizadas pelas limitações geográficas, que são o levantamento sísmico terrestre e o levantamento sísmico marítimo. Embora cada método possua um conjunto de características próprias, os aspectos do dimensionamento de um levantamento sísmico são gerais. Estes aspectos serão discutidos nesta seção.

O levantamento sísmico pode ser realizado de maneira espontânea ou de maneira induzida. Quando se trata de um levantamento espontâneo, tem-se um estudo mais próximo da realidade da sísmica de terremotos, enquanto o levantamento induzido aponta para a sísmica exploratória. Partindo-se desta premissa, tem-se a necessidade de se caracterizar o tipo de fonte de energia que deverá ser empregada no estudo sísmico exploratório. O dimensionamento da fonte de energia abarádiver-

tos aspectos da aquisição, como por exemplo: o conteúdo de frequências a ser enviado para subsuperfície e a profundidade máxima que o sinal terá penetração e retorno, dentre outros aspectos. Os aspectos físicos e de funcionamento das fontes de energia são os mais variados (vibradores, explosivos, jatos de ar - veja na figura 8), embora o objetivo seja essencialmente o mesmo: provocar uma grande deformação em uma determinada camada, de maneira localizada tanto no contexto temporal quanto espacial. Esta singularidade, ao se aniquilar devido à limitação espaço-temporal, produz uma perturbação no meio no qual está localizada e que se estende pelas vizinhanças, devido à continuidade lateral, que passam a apresentar um comportamento correlato, estabelecendo-se assim uma reação similar a uma reação em cadeia.

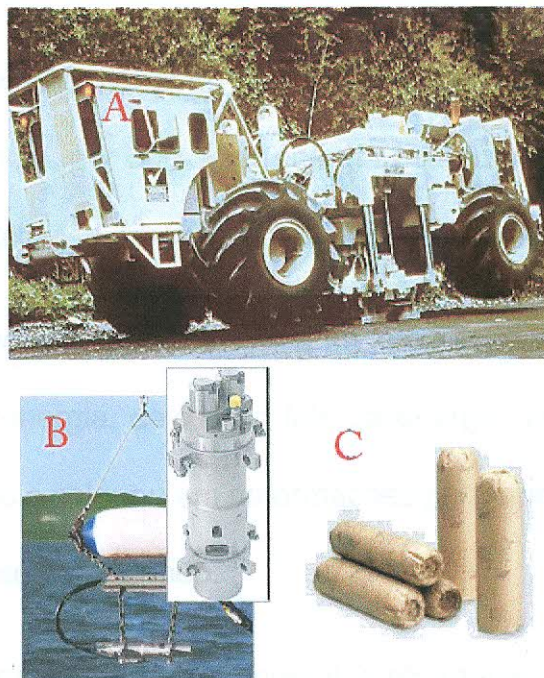


Figura 8: Principais fontes de energia utilizadas na sísmica exploratória. Vibradores (A), explosivos (B) e Jatos de ar (C). Adaptado de <http://www.lithprobe.ca>, <http://www.tdi-bi.com> e <http://www.austinpowder.com>

No entanto, diferentemente de uma reação em cadeia, onde o sistema foge do controle devido ao fato de que a energia disponível para os eventos seguintes aumenta com o número de elementos participantes da reação, a propagação de uma

perturbação sísmica, daqui por diante denominada onda sísmica, possui a energia disponível, por elemento excitado, para excitar os elementos futuros se apresenta cada vez menor, caracterizando uma sensível atenuação do sinal ao passo que se os elementos excitados estão mais distantes da fonte de energia, a esta atenuação dá-se o nome de divergência esférica, que será discutida a seguir na seção 3.2. Este tipo de atenuação, como o seu próprio nome sugere, se encaixa sobre uma superfície esférica, ou seja, ao se integrar toda a energia contida em uma determinada casca esférica, delimitada por um instante de tempo t , são três as situações possíveis:

- O valor da integração é igual a uma integração a se realizar em um instante subsequente: Fenômeno de divergência esférica, apresentado anteriormente.
- O valor da integração é menor do que o da integração a se realizar: Fenômeno de reação em cadeia, por converter energia potencial armazenada em energia disponível para excitação durante o processo de perturbação.
- O valor da integração é maior do que a da integração a se realizar: Fenômeno de atenuação de energia, devido ao fato da energia ser convertida em formas indesejáveis, como o calor ou em deformações permanentes dos corpos onde a perturbação está se propagando.

Como todo procedimento experimental apresenta a necessidade de registrar a resposta do objeto de estudo a um pulso de entrada inicial (espontâneo ou não), aspectos como a quantificação, especificação e organização dos sensores de captação também são tarefas importantes para a execução de um levantamento sísmico de qualidade. Os dispositivos atuais de captação de sinais sísmicos são microfones que possuem a capacidade de captar frequências baixas. Estes microfones (geofones ou hidrofones - figura 9- A e B), normalmente realizam a leitura de somente uma compo-

nente da perturbação que se propaga, exigindo que a colocação do dispositivo permita o melhor acoplamento acústico entre o sensor e a superfície, ou seja, a melhor leitura possível da perturbação que se manifesta naquele ponto onde o sensor fora conectado. Encontram-se atualmente no mercado, sensores capazes de captar as perturbações em mais de uma direção (figura 9-C). Estes tipos de sensores permitem com que tanto as ondas S quanto as ondas P possam ser registradas, aumentando sensivelmente a quantidade de informação disponível. Entretanto, essa classe de dispositivo apresenta um grau de sensibilidade maior ao acoplamento acústico, exigindo uma perícia mais elevada das pessoas que realizam a sua colocação no campo. Como a sismica exploratória vislumbra a aquisição de respostas induzidas, fica evi-

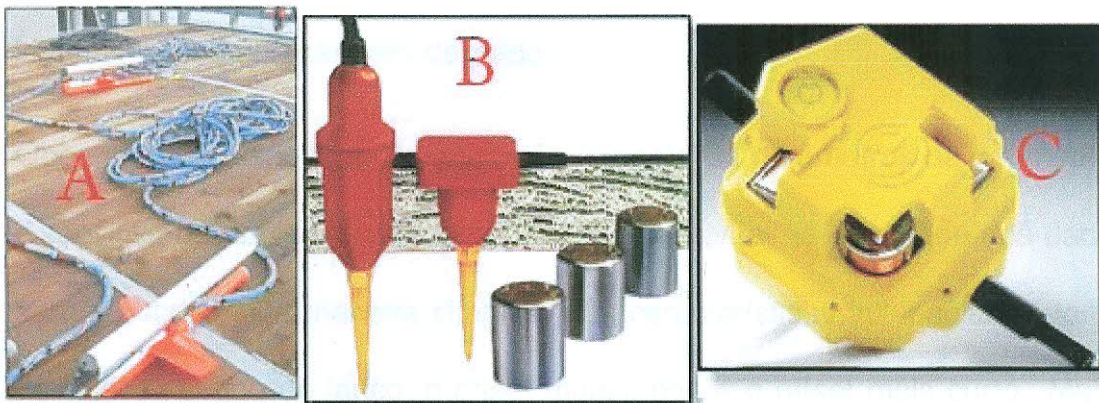


Figura 9: Dispositivos de captação de sinais sísmicos. Hidrofones (A), Geofones de 1 componente (B) e Geofones de 3 componentes (C). Adaptado de <http://www.lithprobe.ca>, e <http://www.geospaceip.com>

dente o vínculo entre as fontes de energia e os receptores de dados. A caracterização dos elementos pertinentes a fontes e receptores será responsável pelas pequenas divergências que caracterizam os distintos levantamentos sísmicos, a saber:

- Quantidade de carga: A quantidade de carga depositada em um determinado ponto de tiro, ou o tempo de vibração em um determinado ponto afeta o conteúdo de frequência do sinal a ser registrado (quantidade de carga e frequência mínima apresentam relação proporcional inversa), a resposta dos dados após o empilha-

mento (etapa pertinente ao tratamento dos dados), o impacto ambiental gerado (no caso de explosivos) e o custo do levantamento.

- Profundidade da carga: A profundidade em que a carga será depositada pode afetar a operacionalidade do projeto, uma vez que furos mais profundos demandam, invariavelmente, mais tempo para serem realizados. Estas mudanças na operacionalidade do projeto podem acarretar em uma intermitência na preparação dos furos para de detonação o que conduzirá a uma modificação da equipe de realização dos furos, podendo aumentar os custos do levantamento. O efeito ghost, efeito de natureza indesejável que será discutido mais adiante, sofre influência da profundidade da carga. O equilíbrio entre este efeito e o custo de levantamento pode ser bem delicado.
- Geometria do dispositivo de aquisição (lanço): Os parâmetros da geometria do dispositivo de aquisição exercem papel fundamental na qualidade dos dados a serem obtidos. De maneira simples, três características influenciam a tomada de dados: O tipo de lanço, o offset mais longo e o offset mais curto. Maiores detalhes serão apresentados a seguir.
- Intervalos entre estações: O espaçamento entre os distintos conjuntos de captação de sinais poderá interferir no aspecto do conjunto de dados levantados. Este elemento será discutido em conjunto com a geometria do lanço.
- Intervalo entre pontos de tiro: O distanciamento entre os pontos onde serão geradas as perturbações podem influenciar na qualidade dos dados, uma vez que este distanciamento se apresenta correlacionado com a quantidade de sinal que poderá ser captado pelos sensores. A variação desta quantidade influencia diretamente a operacionalidade do projeto de levantamento assim como o custo

do mesmo.

De maneira geral, a região de interesse para levantamento sísmico possui dimensões consideravelmente grandes, o que torna inviável a distribuição dos sensores por toda a região para uma aquisição *just-in-time*, devido a limitações no tocante de quantidade de material. Mesmo que este tipo de espalhamento fosse possível, o efeito de divergência esférica, apresentado anteriormente, exerceria um papel central ao atenuar severamente o sinal gerado pela fonte, fazendo com que o registro do sinal a grandes distâncias se torne uma tarefa de dificuldade elevada. A despeito de tal efeito, outro fator que se apresenta como complicador é o volume de dados a ser gerenciado pelo equipamento de aquisição. Se a aquisição *just-in-time* fosse possível, o volume a ser transferido ao longo dos cabos de aquisição assumiria um valor astronômico, exigindo uma rede de dados de altíssima velocidade, que normalmente eleva os custos do levantamento. Uma maneira de solucionar esse pequeno impasse repousa sobre a segmentação da região de interesse geológico em lanços. Cabe ressaltar que este efeito indesejável não é o único efeito presente durante a aquisição sísmica, no entanto o mesmo é suficiente, no momento, para justificar a segmentação da aquisição.

Essencialmente, existem três tipos de levantamentos sísmicos, que estão correlacionados com a quantidade de componentes espaciais registradas. Os levantamentos sísmicos podem ser classificados como:

- Levantamento sísmico 2D
- Levantamento sísmico 3D
- Levantamento sísmico 4D

Em todos os levantamentos sísmicos uma das componentes espaciais encontra-se medida através do tempo de trânsito do sinal sísmico entre a sua geração e recepção. De uma maneira simplista, pode-se enxergar um levantamento de uma quantidade de dimensões superior como uma extensão do seu predecessor. A discussão a seguir deverá esclarecer esta declaração.

3.1.1 LEVANTAMENTO SÍSMICO 2D

Os levantamentos sísmicos 2D, foram amplamente utilizados no início da geofísica exploratória, continuando em uso atualmente, no entanto ocupando uma parcela pouco significativa. Essencialmente, os lanços deste tipo de levantamento cobrem trechos de um programa sísmico ou linha sísmica. Como os programas sísmicos possuem dimensões elevadas, o registro é realizado em etapas, devido aos fatores mencionados anteriormente em conjunto com limitações relativas à quantidade de material. Os sensores, assim como as fontes de energia, ao serem espalhados ao longo da linha sísmica, cobrem uma região maior que as dimensões do lanço, com o intuito de facilitar a manutenção da aquisição dos dados com o mínimo de interrupções dentro de uma janela de produção.

Os pontos de registro de sinal são denominados estações. Cada estação pode possuir mais de um sensor conectado, com o intuito de se eliminar efeitos indesejáveis. Quando a estação abarca mais de um sensor, a disposição espacial dos mesmos passa a influenciar nos resultados obtidos, apresentando a necessidade de um estudo sobre as opções. O afastamento entre as estações apresenta impacto direto na amostragem espacial dos refletores. O distanciamento entre os sensores e a fonte passa a ser um outro aspecto importante para a qualidade dos dados obtidos. Se um sensor se encontrar muito próximo de uma fonte, o mesmo pode se saturar,

comprometendo a leitura do sinal. Sensores muito distantes irão captar uma parcela muito pequena do sinal, mas uma vez captada esta parcela exercerá um papel fundamental. A menor distância entre os receptores e a fonte de energia serve como limitador da menor profundidade que será observada durante o levantamento, uma vez que os métodos atuais de análise de dados sísmicos estão apoiados sobre a técnica de CMP/CDP. O maior afastamento entre a estação e a fonte de dados influencia na multiplicidade dos dados, leitura e identificação de reflexões secundárias, leitura de refletores mergulhantes e aumento da franja de migração, que serão discutidos na seção 3.2. A multiplicidade também é afetada pela simetria do dispositivo de registro. Caso um lanço apresente uma aparência assimétrica, a multiplicidade tende a ser menor do que em um dispositivo simétrico.

3.1.2 LEVANTAMENTO SÍSMICO 3D

O número de canais ativos se tornou cada vez maior com os avanços tecnológicos. Com o galgar da tecnologia, as restrições sobre os comprimentos do lanço se tornaram cada vez menores, aparentemente, a limitação de sensibilidade dos sensores passou a ser o fator que regula o tamanho do dispositivo de registro. Como a disponibilidade de canais ativos continuou com o seu vertiginoso crescimento, desvinculado das limitações dos sensores em si, o adensamento das estações de registro passou a ser a nova tendência para as linhas sísmicas 2D. No entanto o crescimento de canais ativos disponíveis não encontrou no adensamento das estações os freios em sua escalada rumo ao crescimento. A solução natural e muito bem vinda para o aproveitamento desses canais ativos disponíveis foi a aquisição múltipla e simultânea de linhas 2D paralelas. Estas linhas passariam a registrar as três dimensões espaciais com um custo elevado, comparado com os levantamentos sísmicos 2D, no entanto com um

volume de dados muito maior que seu predecessor.

Ao se realizar um levantamento sísmico 3D, as dimensões do lanço apresentam efeitos consideráveis na qualidade dos dados adquiridos. Os efeitos do arranjo geométrico entre fontes e receptores receberam um natural refinamento, devido ao fato de que as fontes ganham a possibilidade de receber uma orientação distinta da orientação das linhas de registro, configurando-se assim um refinado problema de dimensionamento de cela e multiplicidade. Outro efeito que se manifesta durante a aquisição sísmica 3D é o efeito inline. Tradicionalmente as dimensões longitudinais do lanço são expressivamente maiores que as suas dimensões laterais. Esta assimetria introduz tendências no conjunto de dados registrado, o que propicia uma amostragem de qualidade inferior em termos de azimuth. Este tipo de problema pode ser amortizado com um número maior de linhas paralelas levantadas durante a aquisição o que eleva o custo e as dificuldades operacionais do levantamento.

3.1.3 LEVANTAMENTO SÍSMICO 4D

Nos últimos anos, na indústria do petróleo, uma nova técnica de levantamento vem sendo implementada. Esta técnica vislumbra o monitoramento da evolução das propriedades de uma determinada locação (invariavelmente uma rocha reservatório). Esta técnica é constituída por diversos levantamentos sísmicos 3D realizados na mesma locação em tempos (aproximadamente 5 anos). Dá-se o nome de levantamento 4D a esta técnica devido ao fato de o tempo transcorrido entre os dois levantamentos ser uma componente presente na análise. Como normalmente a qualidade dos levantamentos 3D apresenta aspectos distintos devido a evolução tecnológica, o nivelamento da qualidade dos dados se faz necessário. Este tipo de nivelamento pode ser feito através da simulação da piora dos dados que apresentam melhor qualidade

(invariavelmente os dados mais recentes) ou através de um novo processamento dos dados mais antigos. No entanto o esforço resultante de equalização dos dados resulta na tentativa sistemática de melhora dos dados que apresentam pior qualidade em conjunto com a piora controlada dos dados que apresentam qualidade melhor.

3.1.4 ALGUNS COMENTÁRIOS SOBRE OS LEVANTAMENTOS 2D, 3D E 4D

Embora a discussão sobre os levantamentos possa passar a impressão de que tais técnicas são localizadas temporalmente de maneira estanque, cabe salientar que este tipo de sensação não está correta. Os levantamentos sísmicos de dimensionalidades menores ainda são utilizados atualmente para a obtenção de dados de maneira expedita. Não obstante, é importante ressaltar que a migração de uma tecnologia ocorreu de maneira suave, gradual e experimental, fazendo-se com que algumas técnicas intermediárias surgissem de maneira eventual. Houve, por exemplo, durante a migração da técnica 2D para 3D¹ um esforço muito grande de se compilar diversos levantamentos sísmicos 2D proximais com o intuito de construir um levantamento 3D. Evidentemente, este tipo de esforço apontava para a direção certa, mas não o fazia para o local correto, uma vez que a falta de vínculos temporais entre os eventos registrados em linhas vizinhas introduziam incertezas que poderiam aderir permanentemente nos dados.

Da mesma forma, a técnica que atualmente é denominada de levantamento sísmico 4D, na visão do autor, será, em um futuro próximo, renomeada de 3.5D, uma vez que, por exemplo, o posicionamento dos sensores de registro, entre os distintos levantamentos, não é o mesmo. No entanto, como já fora mencionado, existem sinalizações para uma nova geração de levantamentos sísmicos, onde os sensores

¹Dá-se, informalmente, o nome de levantamento 2.5D

de registro são mantidos fixos entre os levantamentos subsequentes.

3.2 Processamento Sísmico

O tratamento de um conjunto de dados é uma etapa que se faz necessária devido ao fato da existência de condições não ideais para a aquisição dos mesmos. Isto significa que entre a geração de um sinal e recepção da resposta da interação deste sinal com o objeto de estudo existe a ocorrência da contaminação da informação por efeitos que não desejados. No caso de dados sísmicos, cabe ao processamento sísmico realizar as correções devidas para que as informações desejadas sejam obtidas. O objeto de estudo, no caso da sísmica exploratória, em uma aproximação de primeira ordem, é constituído por estruturas localizadas em subsuperfície que apresentam estratificações plano-paralelas. Cada uma das camadas apresenta seus constituintes internos com uma distribuição isotrópica e homogênea com transição pontual no eixo vertical.

Para o tratamento dos dados obtidos em um levantamento sísmico, um modelo da evolução do sinal se faz necessário. Esta modelagem pode ser obtida através de um modelo convolucional simples. Segundo o modelo convolucional, um registro sísmico (apresentado na figura 10) é o resultado da interação das três componentes citadas anteriormente:

$$R = S * E * I + N \quad (1)$$

O símbolo (*) representa uma operação de convolução. As quantidades S, E, I e N representam o sinal gerado pela fonte, as estruturas em subsuperfície, os efeitos indesejáveis e os ruídos aditivos respectivamente. Em princípio, na ausência de ruídos com caráter aditivo, todas as componentes presentes no registro sísmico são passíveis de inversão, ou seja, existe uma determinada operação que transforma

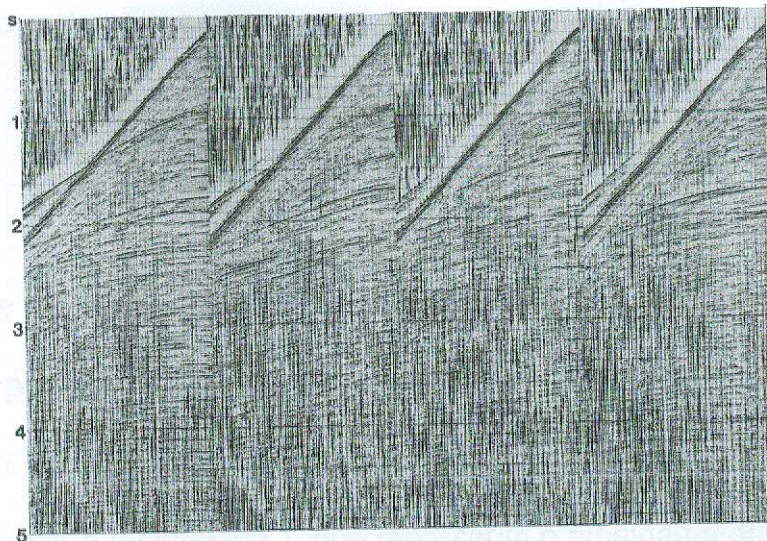


Figura 10: Exibição de quatro CMPs distintos um sismograma marítimo típico.
Adaptado de Yilmaz (2001).

os dados na identidade. Sendo assim, pode-se acreditar que existe a operação inversa X , para S :

$$S * X = 1, \quad (2)$$

assim como para I , W :

$$I * W = 1. \quad (3)$$

Ao se aplicar estas operações inversas na definição de registro sísmico, obtem-se:

$$X * W * R = X * W * S * E * I \quad (4)$$

Como a operação de convolução possui caráter comutativo, pode-se escrever:

$$X * W * R = X * S * W * I * E \quad (5)$$

Aplicando as definições de operação inversa previamente definidas, tem-se:

$$X * W * R = E \quad (6)$$

Por simplicidade pode-se escrever:

$$T * R = E \quad (7)$$

Pode-se notar, como já fora dito anteriormente, que as estruturas que se localizam em subsuperfície, podem ser estimadas a partir das funções inversas aplicadas ao sinal sísmico. Cabe ao processamento sísmico determinar estas quantidades.

Ao observar a quantidade T , que representa o amalgaço das funções X e W , questionamentos sobre indivisibilidade das quantidades X e W passam a se manifestar como processo subsequente da compreensão do modelo. De fato, as quantidades X e W (especialmente W) são representações da compilação de diversos efeitos distintos. Ao analisar os efeitos indesejáveis, encontra-se o primeiro amalgaço, uma vez que os mesmos podem ser descritos através de duas componentes distintas, a saber:

- Efeitos de Propagação
- Efeitos de Instrumentação

A primeira delas associadas aos efeitos que, conforme o nome sugere, a onda sísmica sofre ao se deslocar em um determinado meio ou na interface entre dois meios distintos. Ocorre, nesta parcela, o fenômeno de divergência esférica, que fora discutido de maneira bem simplista anteriormente, enquanto que a segunda componente abarca os efeitos instrumentais, uma vez que, sem realizar aprofundamentos na seara filosófica, associados à uma limitação do ser humano sobre compreensão da modificação íntima que o ato de observar incute no objeto de estudo, fornecendo ao observador uma leitura de realidade diferente do verdadeiro âmago do objeto, caso o mesmo nunca fosse observado. Esta componente, que é um dos elementos do princípio da incerteza

de Heisenberg, um dos pilares da mecânica quântica, responsável pela visão contemporânea da física ondulatória, resulta (entre outros) no fato do ser humano ser incapaz de construir objetos de registro genuinamente perfeitos.

3.2.1 ASPECTOS GERAIS DE UM SISMOGRAMA

A exibição típica de um sinal sísmico é realizado através de sismogramas. Estes gráficos possuem o objetivo de compilar a resposta de todo o conjunto de sensores que foram distribuídos nos entornos do ponto onde a fonte de energia fora depositada, mostrando a evolução temporal dos mesmos. As reflexões que ocorrem nas interfaces das camadas serão exibidas no sismograma. De maneira geral, os sismogramas possuem os seguintes componentes:

- Onda direta
- Onda refratada
- Reflexão primária
- Fantasma associada à fonte e aos receptores
- Reflexão secundária e Reverberações
- Onda Rayleigh e Love
- Onda aérea
- Difração

Cada um dos componentes mencionados se apresenta de maneira distinta em um sismograma. O objetivo desta subseção é discutir os aspectos básicos de cada um destes componentes.

3.2.1.1 Onda Direta

No momento do acionamento da fonte de energia, uma frente de propagação da perturbação referente ao acionamento do dispositivo é gerado. Esta frente de propagação, de forma esférica, terá uma parcela que será emitida em um ângulo muito baixo em relação à linha horizontal, tendo o seu ponto de interação na interface muito distante da fonte. Durante o seu trajeto até o seu ponto de interação, a frente de onda tenderá a encontrar os sensores que estão localizados na superfície. No momento que este encontro ocorre, o sinal desta perturbação é captada, uma vez que o ângulo entre esta frente de onda e a superfície não é um ângulo nulo completo, o seno deste ângulo assume um valor muito pequeno, no entanto ainda diferente de zero, fazendo que haja uma projeção pequena do sinal referente a esta onda na direção de oscilação do sensor, permitindo que a onda se encontre passível de captação.

Como o ângulo entre a direção de propagação e a linha do horizonte é muito pequeno, o cosseno do ângulo em questão é muito próximo da unidade ², conseqüentemente, a velocidade de propagação da frente de onda de acionamento dos sensores de superfície, quando projetada na horizontal, possui valor muito próximo da velocidade de propagação da onda no meio. Como a velocidade, nestas circunstâncias, não apresenta nenhuma dependência com o afastamento das estações, o intervalo de tempo entre o acionamento de dois sensores consecutivos é uma constante. Este tipo de comportamento pode ser visualizado na sismografia através de uma reta que passa pela origem (figuras 11-A, 12-A e 13-A).

Para uma situação simples, como a situação hipotética apresentada na subseção 3.2.1.3, as ondas diretas e as reflexões primárias se encontram-se de fato correlacionadas. A hipérbole, curva que representa os tempos de acionamento em que

²em primeira ordem o valor da expansão de Taylor é exatamente 1

os sensores captarão as reflexões primárias, é uma curva assintótica, ou seja, uma curva que lentamente se aproxima de alguma outra curva (assíntota) e que as mesmas se encontram somente no infinito. No caso de estudo em questão, a assíntota da hipérbole de reflexão é justamente a onda direta. O mesmo pode ser compreendido através da relação das trajetórias percorridas por ambas frentes de onda em seu trajeto entre fonte e receptor. Ao passo que os afastamentos se tornam maiores, o efeito da profundidade em que a superfície em que ocorreu a reflexão se torna cada vez menor, aproximando as características da onda a ser refletida com as características que foram apresentadas no começo desta seção, no entanto o comportamento será idêntico somente no infinito. Cabe ressaltar que a onda direta se propaga muito próximo à interface. A propagação de ondas na interface será apresentada na seção 3.2.1.6.

3.2.1.2 Onda Refratada

Continuando a discussão sobre o comportamento da frente de onda em uma interface entre dois materiais, a parte da onda que não é refletida é transmitida para o outro meio, no entanto devido ao fato das impedâncias acústicas dos meios não serem concordantes, para que haja a conservação de energia e momento, a onda que se propagará no novo meio possuirá orientação diferenciada do original. A configuração entre os arranjos geométricos entre ondas incidentes, refletidas e refratadas em uma interface é regida pelas Lei de Snell-Descartes para uma configuração planar e pelas Equações de Zoeppritz para o caso genérico onde a conversão de modos de propagação ocorre.

Como a nova direção de propagação será função da direção de propagação prévia da onda, existirão valores de afastamentos em que os seus pontos de interação

equivalentes em subsuperfície passarão a sofrer reflexão interna total. Na situação intermediária, ou seja, para ângulos de incidência que possuam valor idêntico ao ângulo crítico da interface, a perturbação se propagará na interface, com velocidade igual a da camada inferior. Pode-se perceber que o comportamento destas ondas de interface é idêntico ao comportamento das ondas diretas, no entanto somente os sensores dispostos após o afastamento crítico que registrarão este sinal. Sendo assim, a onda refratada possui o mesmo aspecto da onda direta, ou seja, uma linha reta. Diferentemente da onda direta, a onda refratada não passa pela origem e ela intercepta a linha que representa a onda direta no afastamento onde a reflexão total se inicia (figuras 11-B e C e 13-B).

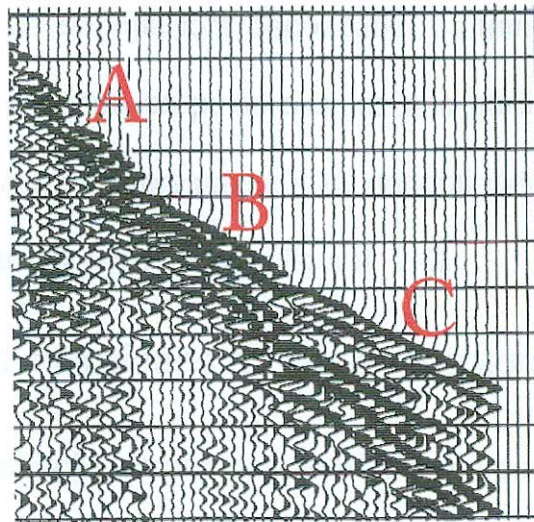


Figura 11: Exibição da onda direta (A), Onda Refratada na primeira camada (B) e Onda refratada na segunda camada (C). Adaptado de Yilmaz (2001).

3.2.1.3 Reflexão primária

Segundo o modelo convolucional apresentado previamente, o registro sísmico, que pode ser materializado através de sismogramas, representa a convolução de diversas componentes com a informação de subsuperfície, que se encontra representada pela função refletividade. A função refletividade exhibe os locais onde existe a ocorrência

de contrastes de impedância. Os contrastes de impedância são responsáveis por mudanças nas características de propagação de uma onda, quando a mesma está, por exemplo, em transição de um meio para outro. Por conservação de energia e momento, nem toda a energia aplicada na interface será transmitida para o outro meio, portanto, parte será refletida. Contemplando uma situação hipotética em que haja somente a ocorrência de uma única interface em subsuperfície, plana e paralela à horizontal, parte da onda refletida será direcionada para os sensores que se encontram na superfície.

Dando prosseguimento e levando em consideração a situação hipotética supracitada, assim como o fato dos sensores se encontrarem, invariavelmente, afastados do ponto onde a fonte de energia fora depositada, os tempos em que os distintos sensores registrarão a chegada do pulso sísmico não serão iguais. Os tempos de ativação dos sensores recaem sobre uma cônica denominada hipérbole. Exemplos de reflexões primárias estão apresentados na figura(12-B).

3.2.1.4 Fantasmas associadas a fonte e receptores

Devido ao fato da perturbação gerada pela fonte de energia se propagar sobre uma frente de onda de forma esférica, por definição, todas as direções de propagação são naturalmente contempladas. No caso da fonte de energia se encontrar enterrada, uma parcela desta perturbação se encontrará direcionada para cima, encontrando logo em seguida a interface entre esta superfície e atmosfera. Como o contraste de impedância entre estas duas interfaces é consideravelmente grande, em termos práticos, toda a perturbação sofre reflexão na interface, se direcionando para baixo como a maior parcela da perturbação que já se propagava nessa direção, no entanto, existirá uma diferença de tempo pequena entre estas duas frentes de onda, ocasionando a capta-

ção múltipla do sinal no sensor. A este tipo de fenômeno dá-se o nome de fantasma associado à fonte. Um fenômeno similar pode acontecer no momento da captação do sinal, onde parte da onda refletida na interface de interesse sofre uma reflexão na interface com a atmosfera antes de atingir os sensores. A este outro dá-se o nome de fantasma associado aos receptores. Como as polarizações se invertem em cada uma das reflexões ocorridas na interface que separa o meio onde estão os sensores e a superfície, assim como as profundidades típicas de fontes e receptores, quando existem, não são muito elevadas, pode-se apreciar uma alteração na forma da pulso registrado na sismografia, uma vez que alguns dispositivos de registro são somente sensíveis à amplitude da perturbação, enquanto outros à perturbação e sua direção de propagação.

3.2.1.5 Reflexões secundárias e Reverberações

A perturbação, em seu trajeto entre fonte e receptor, pode sofrer uma ou mais reflexões em interfaces não esperadas. De maneira geral a ocorrência destes eventos, no que tange à terminologia, se dividem em duas grandes classes: As reverberações e as Reflexões secundárias.

As reverberações são reflexões de curto percurso, ou seja, as interfaces que promovem o confinamento da perturbação se encontram razoavelmente próximas. Quando o evento é detectado pelos sensores na superfície, o mesmo acontece inúmeras vezes em um determinado intervalo de tempo, fazendo com que o pulso registrado interfira com a sua reflexão. Na sismografia, uma reverberação é representada através de várias hipérboles similares muito próximas.

Quando as reflexões são de longo percurso, uma ou mais reflexões ocorrem na interface ar-superfície de registro (ou em uma zona com um fortíssimo contraste

de impedância) com re-propagação da perturbação na direção do horizonte de interesse. A informação registrada nos sensores de superfície apresentará um tempo de chegada que será um múltiplo inteiro do tempo duplo da reflexão direta. A polaridade do sinal a ser registrado sofre uma inversão de valor, além dos efeitos de divergência e atenuação pertinentes, a cada vez que ocorre uma reflexão na interface ar-superfície de registro, sendo assim, conseqüentemente, a polaridade do sinal a ser registrado é igual a n -ésima potência do valor -1 , onde n passa a representar o número de reflexões na interface atmosfera-superfície de registro. Nos sismogramas as reflexões secundárias, também conhecidas como múltiplas, se apresentam como hipérboles com tempo de afastamento zero igual ao múltiplo de alguma reflexão prévia e com assíntota menor do que os horizontes verdadeiros para as faixas temporais proximais (figura 12-C).

Cabe salientar a existência de uma terceira classe de múltiplas, que representa a combinação dos efeitos citados anteriormente. Quando este tipo de fenômeno ocorre, o trajeto da onda refletida até o seu ponto de re-propagação é menor do que o caminho até a superfície, propiciando a possibilidade de ocorrência da múltipla em um valor de tempo que não seja um múltiplo inteiro do tempo de chegada da reflexão primária equivalente. A este tipo de reflexão dá-se o nome de múltiplas assímetricas (*peg-leg multiples*).

3.2.1.6 Ondas Rayleigh e Love

Excetuando-se o momento em que a refração de ondas foi abordada, todas as frentes de ondas comentadas ao longo da discussão apresentada nesta subseção contemplam somente um tipo de onda: As ondas de corpo. Ou seja, os diversos modos de propagação de perturbação ao longo de um determinado meio, e que atende à



Figura 12: Exibição da onda direta (A), Reflexão primária (B) e Reflexão secundária (C) em um sismograma marítimo. Adaptado de Yilmaz (2001).

um conjunto de condições matemáticas bem conhecidos. No entanto, quando o problema de transição de interfaces é contemplado, fenômenos extras devem ser levados em conta, conforme fora mencionado durante a discussão sobre a refração das frentes de onda, com o intuito de permanecer a obediência às leis de conservação de energia e momento. A problemática atinge um dimensionamento ainda maior ao passo que a transição entre meios gera singularidades que se manifestam na fronteira durante o processo de transição e desaparecem, naquele ponto, após a cessão da passagem da onda pela interface. No entanto, o objeto matemático que propicia o casamento das condições de contorno necessárias na conversão de um modo de propagação para outro durante a transição de interface, não se aniquila por completo, se deslocando para algum ponto vizinho ao ponto de transição. Como qualquer problema de mecânica quântica ou eletromagnetismo onde há deslocamento de fase e/ou penetração de barreiras, a onda intermediária apresenta decaimento exponencial de sua amplitude em função do afastamento do ponto de transição.

Ao contemplar esse cenário, pode-se perceber a analogia com o mecanismo de acionamento da fonte de energia em subsuperfície e, por conseguinte, torna-se na-

tural a expectativa de que ondas de perturbação possuam a tendência de se propagar na interface entre os dois meios.

As ondas Rayleigh (também conhecidas como *ground roll*) e Love são dois tipos de ondas de fronteira, ou ondas de superfície, que se apresentam quando uma frente de onda tende a realizar a transição de um meio para o outro. As características de propagação destas ondas são bem distintas. Enquanto a onda Love se propaga de maneira cisalhante, com o plano de movimentação paralelo à superfície, o que faz com que a captação deste tipo de sinal seja cabível somente à sensores multicomponente, as ondas Rayleigh apresentam um comportamento similar às ondas do mar, onde as partículas atingidas pela perturbação executam movimentos elípticos. Em princípio, a elipse onde as partículas perturbadas irão executar os movimentos está contida em um plano que também contém o vetor que define a direção de propagação da perturbação. Os sensores convencionais de superfície captarão as projeções destas perturbações ao longo de seu eixo de oscilação.

Como as ondas Rayleigh (figura 13-C) apresentam caráter dispersivo, ou seja, apresentam valores de velocidade de propagação distintos para os diversos comprimentos de onda a se propagar, o aspecto deste tipo de onda em um sismograma é de uma linha reta, assim como para a onda direta, no entanto as velocidades de propagação das ondas de superfície são menores do que as das ondas de corpo, fazendo-se com que as retas associadas às ondas Rayleigh possuam uma inclinação mais acentuada em relação ao eixo horizontal. Espera-se que mais de uma reta seja observada devido ao caráter dispersivo.

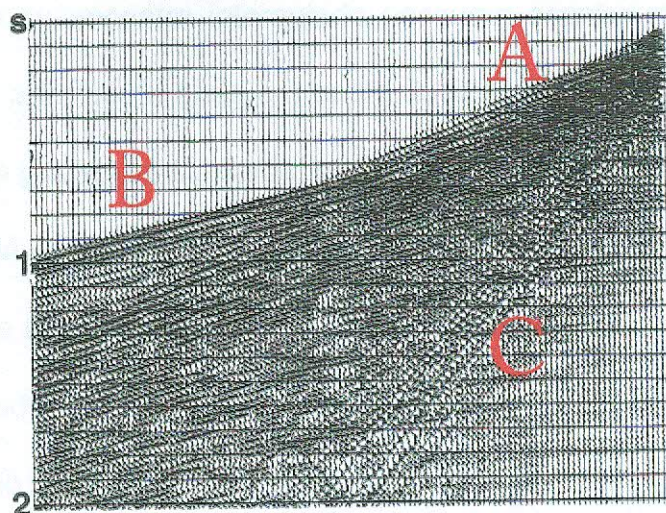


Figura 13: Exibição da onda direta (A), Onda Refratada (B) e Onda Rayleigh (C) em um sismograma terrestre. Adaptado de Yilmaz (2001).

3.2.1.7 Onda aérea

Se durante o processo de acomodação e cobertura dos explosivos (tamponamento) ocorrer algum tipo de falha que faça com que uma quantidade de material menor que a necessária lá se encontre no momento da detonação, o processo de acionamento das fontes de energia propiciará a ejeção deste material transmitindo uma perturbação não contemplada para a atmosfera. Esta perturbação irá se propagar de modo turbulento e atingirá os sensores de superfície que captará, assim como no caso da onda direta e Rayleigh, somente uma parcela do sinal, referente às projeções. A onda de choque na atmosfera se propaga com uma velocidade fixa de aproximadamente 343 metros por segundo. A identificação da reta que representa a onda aérea é de fácil identificação nos sismogramas.

3.2.1.8 Difração

A lei de Snell-Descartes assim como as equações de Zoeppritz trabalham o tratamento da frente de onda na transição entre dois meios distintos quando uma premissa básica é satisfeita. Esta premissa está apoiada no fato das frente de onda e o objeto

com que a mesma se encontra interagindo possuem escalas de tamanho diferentes. No entanto, se a frente de onda e o ponto de interação possuem dimensões, em termos de ordem de grandeza, similares, uma nova classe de fenômeno se apresenta. A este fenômeno dá-se o nome de difração. *Strictu sensu*, difração significa desvio, ou seja, uma frente de onda ao interagir com o seu ponto difrator, sofre um desvio na sua frente de onda, constituindo padrões típicos de difração, que são característicos da geometria do centro difrator e das características da frente de onda incidente. Maiores detalhes sobre o fenômeno de difração podem ser encontrados em (JACKSON, 2007). As difrações, em um sismograma sintético, para um difrator pontual, podem ser visualizada como uma hipérbole.

3.2.2 ETAPAS DO PROCESSAMENTO SÍSMICO

Os aspetos gerais de um sismograma foram introduzidos na seção 3.2.1. As discussões foram baseadas em modelos simples, onde as superfícies refletoras são planas e paralelas ao horizonte e com contraste de impedância bem definidos. Na prática a realidade se apresenta ligeiramente diferente: As superfícies refletoras eventualmente apresentam estruturação diferente, apresentando refletores inclinados em relação à horizontal, assim como o contraste de impedância entre as camadas pode ser muito sutil, fazendo-se com que as reflexões não se encontrem bem marcadas. Nesta seção se encontra apontadas as etapas fundamentais de um processamento sísmico, que tem como objetivo principal remover os efeitos indesejáveis de propagação citados na seção anterior, contemplando um cenário mais complexo, permitindo que somente as informações referentes às reflexões sejam preservadas. Tais etapas podem ser listadas na seguinte sequência:

- Pré-processamento

- Deconvolução
- Análise de velocidades
- NMO
- DMO
- NMO inverso
- Análise de velocidades após DMO
- NMO após DMO
- Eliminação de múltiplas
- Empilhamento
- Migração

3.2.2.1 Pré-processamento

Os procedimentos anteriores à uma seqüência tradicional de processamento são realizados nesta etapa. Tais procedimentos englobam a demultiplexação dos dados, etapa que vislumbra o ordenamento dos dados, uma vez que os mesmos são registrados no domínio do tempo comum. Além da demultiplexação, as correções estáticas, quando necessárias, são aplicadas neste estágio, assim como a inserção dos dados sobre a geometria da aquisição. Outros procedimentos como a aplicação de ganhos com o intuito de amenizar os efeitos de divergência esférica e atenuação são efetuados nesta etapa. Atribui-se também ao pré-processamento as filtragens realizadas durante a aquisição dos dados, que são realizadas com o intuito de evitar que o mesmo sofra falseamento espacial ou temporal.

3.2.2.2 Deconvolução do sinal

Um pulso do tipo *spike* se apresenta como o melhor objeto para a leitura das estruturas em subsuperfície, no entanto a produção do mesmo através dos mecanismos atuais de geração constitui um problema de complexidade elevada, e que não possui solução atualmente. Com o intuito de se contornar esse impasse tecnológico, os filtros inversos são aplicados no dado sísmico, uma vez que ao se aplicar este tipo de filtro no sinal referente à uma *wavelet* a resposta a ser obtida será um pulso tipo *spike*. Sendo assim, para tal, torna-se necessário o profundo conhecimento da forma do sinal de perturbação gerado. Embora a solução se apresente de maneira simples, a implementação do mesmo, novamente, se apresenta complexa, uma vez que a aplicação de filtros inversos, necessita, obrigatoriamente, de infinitas constantes para defini-lo perfeitamente, exigindo que aproximações sejam realizadas para que a aplicação deste tipo de técnica seja viável.

Uma vez sanado o problema do dimensionamento do filtro, a aplicabilidade da deconvolução se apresenta de maneira distinta para os levantamentos sísmicos terrestres e marítimos. Enquanto nos levantamentos marítimos este tipo de filtragem se apresenta de maneira satisfatória devido ao fato de se poder registrar o formato da onda a ser gerada com facilidade, os levantamentos terrestres podem apresentar sérios problemas. Se os levantamentos forem realizados com *vibroscis* tem-se o conhecimento da forma de onda de maneira idêntica aos levantamentos marítimos, no entanto se a perturbação for gerada através de detonação de cargas explosivas, o levantamento da forma da onda de perturbação constituirá outro problema de complexidade elevada, uma vez que fatores como o acoplamento acústico entre o explosivo e a superfície e a fração de energia utilizada para realizar a deformação permanente

do solo, dentre outros, não são conhecidos com todo o rigor matemático necessário para a realização de uma modelagem eficaz.

3.2.2.3 Análise de velocidades

A análise de velocidades é uma das etapas cruciais do processamento sísmico. As etapas subsequentes do processamento estão apoiadas neste tipo de análise. O procedimento de análise de velocidades exige, invariavelmente, muito tempo e atenção do responsável pelo processamento (referido como **processador** a partir deste ponto), que tem como objetivo localizar os *trends* característicos dos tempos de ocorrência das reflexões primárias. Estes *trends* podem ser construídos de maneiras diversas, sendo que a técnica mais utilizada está baseada na aplicação de um conjunto amplo de correções de NMO (que será discutido na seção 3.2.2.4) para valores distintos de velocidades e somando todos os traços após a aplicação de tal correção. Quando uma velocidade de correção de NMO a ser aplicada for similar a alguma velocidade do dado sísmico, espera-se que a soma proceda de maneira coerente, provocando que o seu resultado seja um valor consideravelmente diferente de zero. Ao se apresentar graficamente a compilação dos resultados das inúmeras correções de NMO citadas³, o processador possui a sua tarefa de localização de tendências aparentemente facilitada, no entanto o mesmo deve se precaver para não realizar o mapeamento das múltiplas que também apresentarão soma coerente.

3.2.2.4 Correção de NMO

Dá-se o nome de *moveout* para a diferença de tempo de percurso do sinal entre dois geofones distintos que estão captando sinais de reflexão provenientes do mesmo refletor. Ao se considerar o tempo de trânsito entre a fonte e o receptor, o *moveout* recebe

³Dá-se o nome de *semblance* a este tipo gráfico

uma denominação especial, *normal moveout*, cuja sigla é NMO. Pode-se perceber então que a correção de NMO visa escalonar os tempos de registro dos receptores, sincronizando os mesmos para a reflexão de um ou mais refletores em comum, colocando os mesmos sobre uma linha horizontal. No entanto quando dois ou mais refletores são analisados, a possibilidade de ocorrência do fenômeno de **estiramento** se torna razoável. O fenômeno de estiramento ocorre, principalmente, devido ao fato do *normal moveout* dos refletores mais profundos serem, invariavelmente, menores do que os dos refletores mais rasos, sendo assim, a partir de um determinado valor de afastamento as informações sobre as reflexões estarão muito próximas. Este tipo de aproximação impede a recolocação das informações nos tempos corretos sem o preenchimento das amostras temporais que intermediam esses eventos, e que deveriam se encontrar vazias após a aplicação da correção.

Atualmente, se uma região dos dados apresenta estiramento, a mesma é considerada intratável, sendo eliminada através do processo de silenciamento interno, cabendo a ressalva que este tipo de procedimento atenua a contribuição do sinal proveniente relativo aos afastamentos mais longos, o que propicia uma má interpretação do mergulho dos refletores. Este tipo de tratamento pode também influenciar os estudos de AVO.

3.2.2.5 Correção de DMO

As correções de NMO são responsáveis pela horizontalização temporal dos registros de um evento em um determinado conjunto de geofones. Entretanto, este tipo de correção se apresenta eficiente em situações onde os refletores se encontram paralelos ao plano de geofones. No caso da existência de ângulos de mergulho entre esses planos, a correção de NMO deixa de ser suficiente, necessitando que as

considerações dos ângulos de mergulho sejam levados em conta, através da correção de *dip moveout* (DMO). Pode-se notar que na ausência da aplicação da correção de DMO, uma interface entre meios que porventura apresentar um ângulo de mergulho poderá apresentar uma soma que apresente uma área de coerência maior do que a devida, ou seja, apresentando uma família de velocidades possíveis, o que provoca, conseqüentemente, uma distorção do *trend* das reflexões, permitindo que o processador faça uma avaliação incorreta da velocidade para este determinado horizonte e de todos que se localizem abaixo do mesmo.

3.2.2.6 Procedimentos que intermediam a nova correção de NMO

Na subseção 3.2.2.5, a apresentação dos problemas devido a ausência das correções de DMO foi realizada. Com o intuito de dirimir este problema, uma nova correção de NMO se torna essencial, para tal faz-se necessária a aplicação da correção de NMO inversa, que desfaz a correção de NMO anterior para que o segundo processamento, a análise de velocidades, seja realizada. Esta nova análise de velocidades, realizada no conjunto de dados corrigido de DMO, deve, em princípio, apresentar o *trend* das reflexões com uma focalização maior, eliminando-se assim o efeito indesejável citado previamente.

3.2.2.7 Eliminação de múltiplas

Uma vez realizada de maneira eficaz, a análise de velocidades fará com que os verdadeiros eventos se encontrem horizontalizados. No entanto as múltiplas sofrerão uma subcorreção de NMO, apresentando um aspecto não-retilíneo. Este tipo de comportamento diferenciado, para os eventos que representam reflexões múltiplas permite, o desenvolvimento de mecanismos especiais para a redução do efeito desta parcela indesejável.

Existem diversas técnicas para a redução de múltiplas, sendo que algumas destas são classificadas como material sigiloso das grandes empresas que realizam o processamento de dados sísmicos. Mesmo assim, existem duas técnicas que são consideradas como de domínio público, a saber:

- Técnicas baseadas em predição.
- Técnicas baseadas na discriminação de velocidades.

As técnicas de atenuação baseadas na predição vislumbram a realização, em termos gerais, de um filtro preditivo. Este tipo de filtro considera somente eventos que apresentam alguma correlação temporal aceitável, dentro de uma faixa de tolerância definida pelo processador. Pode-se perceber que um evento que não fora devidamente corrigido de DMO e que possua uma inclinação considerável, pode ser eliminado através desta filtragem, no caso do processador fornecer como parâmetro de entrada uma janela temporal muito restrita.

No entanto, pode-se realizar a separação do campo de múltiplas através da inspeção das velocidades. Para tal, o processador deverá realizar uma nova análise de velocidades, no entanto, desta vez, o mesmo deverá registrar valores de velocidades que se encontrem entre o *trend* das primárias e o *trend* das múltiplas⁴. Após esta análise de velocidades, o processador realizará uma dupla transformada de Fourier no seu conjunto de dados, levando o mesmo para o domínio f-k. Ao apresentar graficamente os valores de f e k resultantes da transformada dupla de Fourier, o processador perceberá que o sinal possui a tendência de se aglutinar em dois quadrantes do sistema ordenado, o segundo quadrante representa as reflexões primárias e o primeiro quadrante as reflexões múltiplas. Sendo assim, por conseguinte, uma

⁴Dá-se, obviamente, o nome de velocidade intermediária para este tipo de velocidade

discriminação realizada, cabendo somente ao processador realizar a filtragem adequada para suprimir os efeitos indesejáveis.

3.2.2.8 Empilhamento

O procedimento de empilhamento consiste na realização da média de todos os sinais que são relativos a um mesmo CMP. Embora se apresente como uma tarefa simples, os resultados provenientes deste tipo de operação são de considerável importância. Um dos aspectos mais importantes dos resultados provenientes do empilhamento é o fato de o traço resultante ser uma emulação mais próxima possível de um traço de afastamento nulo, ou seja, um traço registrado no ponto onde houve a detonação.

Como o procedimento de média aritmética envolve a soma dos traços, outro aspecto interessante do empilhamento é a maximização da relação sinal ruído. Cabe ressaltar que esta discussão somente é válida, se os dados se encontrarem corrigidos de NMO, uma vez que as parcelas referentes a um possível refletor somente estarão sincronizadas temporalmente se esta correção for aplicada aos dados. Sendo assim, ao se realizar a soma de todos os traços, as parcelas do sinal que possuírem alguma referência a algum refletor, se somarão de maneira coerente em contraponto aos ruídos de natureza aleatória, que se reduzirão quando este tipo de soma for realizada.

A soma que faz parte do empilhamento tende, naturalmente, a maximizar a relação sinal/ruído dos dados nas regiões próximas dos eventos horizontalizados, os eventos que não se apresentarem horizontalizados, como por exemplo, as múltiplas, assumirão a tendência de sofrer atenuação, para os afastamentos longos, durante esse processo.

Conforme dito anteriormente, dentre os diversos aspectos do empilhamento,

o resultado deste tipo de técnica é uma seção sísmica empilhada em afastamento zero. Como os pontos médios entre fonte e receptor são utilizados para a construção deste tipo de resultado, a seção resultante apresenta, mantendo o número de canais, um dimensionamento menor do que as dimensões características do dispositivo de aquisição.

3.2.2.9 Migração

Uma seção sísmica empilhada apresenta a compilação dos dados adquiridos em relação ao ponto médio entre fonte e receptor, emulando a leitura de um conjunto de dados adquiridos em termos de afastamentos nulos. O escopo da sísmica exploratória, no entanto, se localiza em um tema ligeiramente diferente, uma vez que o mesmo se concentra na localização dos pontos difratores e refletores. Para se considerar os efeitos da difração em um determinado conjunto de dados, corrigindo as informações obtidas do empilhamento, adota-se o procedimento de migração.

Assim como no empilhamento, o procedimento de migração realiza o colapso dos sinais de traços distintos, no entanto, o mecanismo de soma é totalmente diferente. Na seção 3.2.1.8 fora comentado que uma difração típica possui o aspecto de uma hipérbole, sendo assim, para corrigir o efeito das difrações, o colapso dos sinais deve ser realizado ao longo da hipérbole em questão, sendo limitada por um conjunto de parâmetros, definidos pelo usuário, para que o sinal não seja contaminado por eventos não desejados.

Pode-se notar que como as hipérboles de difração são influenciadas pelo campo de velocidades, considera-se muito importante utilizar campos de velocidades bem suaves para que a migração seja realizada sem muitas dificuldades.

Embora existam diversas metodologias para a execução de migrações, onde

a maioria é considerada como material sigiloso das industriais que desenvolvem os mesmos, pode-se classificar o procedimento de migração em dois grandes ramos, que possuem as suas respectivas subdivisões, a saber:

1. Em função do modelo de velocidades:

- Migração em tempo
- Migração profundidade

2. Em função do estágio do processamento:

- Migração Pré-empilhamento
- Migração Pós-empilhamento

Devido a natureza dos nomes dos procedimentos de migração, em relação ao modelo de velocidades, a expectativa de que os resultados do procedimento de migração se apresentem no domínio do tempo ou profundidade, de maneira específica para cada procedimento, é natural. No entanto, esse tipo de expectativa é imprecisa, uma vez que ambos os procedimentos de migração podem fornecer os seus resultados tanto no domínio do tempo como no domínio do espaço. Os elementos que diferenciam essas duas famílias de migração, repousam sobre as características do modelo das velocidades em subsuperfície. Conforme mencionando no início desta seção, o modelo de velocidades deve apresentar uma variação vertical suave. No entanto, comentários sobre a variação lateral de velocidades não foram abordados até este ponto do processamento sísmico. No caso de se considerar camadas homogêneas e isotrópicas, todo o tratamento das difrações pode ser realizada em função do tempo, simplificando as equações de onda utilizada na migração.

Em contrapartida, no caso da existência de variações laterais de velocidade, a utilização das equações de Kirchhoff fica comprometida. Para se contemplar as difrações de maneira correta, as equações de Snell-Descartes necessitam ser tratadas com um nível rigor matemático mais elevado. Essas correções fazem com que a curva onde o sinal deve ser colapsado deixa de ser uma hipérbole. A exigência de suavidade dos mapeamentos de velocidades continuam em vigor para que tal curva também seja contínua.

O processo de migração, além de ser ajustado em função do modelo de velocidades assumido, pode ser caracterizado pelo estágio do processamento em que o mesmo é realizado. No caso da migração ser realizada no final do processamento, com o conjunto de dados que já fora empilhado, a migração a ser aplicada se chama migração pós-empilhamento. Se a migração for aplicada antes do empilhamento do traços, a migração é denominada migração pré-empilhamento. Além dos aspectos referentes ao empilhamento que diferencia os conjuntos de dados utilizados em cada uma das migrações supracitadas, o conjunto de dados que será tratado pela migração pré-empilhamento não deve estar corrigido de DMO⁵, embora o processador possa realizar o DMO e os processos subsequentes, necessários para se obter uma melhor análise de velocidades, e removê-los *a posteriori* para que a migração pré-empilhamento seja realizada.

Em termos de aplicabilidade de cada uma das técnicas, a manipulação dos dados abertos⁶ tende a ser mais custosa, em termos computacionais, do que quando aplicados em conjuntos de dados empilhados. Da mesma forma, níveis de correções numéricas mais elevadas exigem um tempo de computação mais elevado do que os métodos mais aproximados. Sendo assim, conseqüentemente, a migração pré-emi-

⁵O procedimento de DMO também é conhecido como migração parcial pré-empilhamento.

⁶Conjuntos de dados em que o procedimento de empilhamento não foi aplicado.

lhamento em profundidade se apresenta como o procedimento, computacionalmente, mais custoso, no entanto, devido ao fato de não utilizar informações médias dos traços e uma equação mais geral para o tratamento das difrações, os resultados desse tipo de migração são naturalmente mais expressivos do que os outros métodos citados.

Embora, conforme dito no parágrafo anterior, a migração pré-empilhamento em profundidade seja a técnica que apresenta os resultados mais precisos, cabe ao processador escolher, que tipo de migração deve ser adotada para cada conjunto de dados.

4 ESTUDO DE CASO

O material obtido para estudo (MOLINARI, 2003), e que será discutido neste trabalho, tem o seu escopo direcionado para a parte interpretativa do método sísmico. Tal trabalho busca realizar uma análise sismoestratigráfica da bacia de Taubaté e o mesmo somente se torna possível devido a considerável capacidade de resolução do método sísmico.

Pode-se dividir a análise do trabalho utilizado como referência, no que tange à análise, em duas partes: A primeira delas vislumbra a realização de uma análise sismoestrutural, que busca encontrar as estruturas da bacia, citadas no capítulo 2, e seus possíveis elementos geradores, enquanto a segunda foca na própria análise sismoestratigráfica, que contempla a determinação dos elementos estratigráficos no conjunto de dados sísmicos em questão.

A análise sismoestratigráfica supracitada foi realizada em um conjunto de linhas sísmicas adquiridas pela PETROBRAS. No total foram realizados sete levantamentos sísmicos bidimensionais na bacia em questão. A exibição dos dados, assim como a de comentários adicionais, está reservada para as seções seguintes.

4.1 Análise Sismoestrutural

Conforme apresentado capítulo 3, o método sísmico de reflexão realiza o mapeamento dos contrastes de impedâncias ocorridos na região de interesse. Estes contrastes, em princípio, são gerados unicamente pela diferença de litologia, que permitem a mudança nas respostas elásticas, dos meios a serem sondados. No entanto além dos contrastes devido às litologias, efeitos devido a deslocamento de blocos falhados podem apresentar efeitos apreciáveis no sinal sísmico registrado durante a aquisição.

Durante o deslocamento relativo de blocos, ocorre o aparecimento de estruturas onde as maiores transformações ocorrem. Estas estruturas servem como interfaces entre os blocos envolvidos no processo. Em primeira aproximação, estas estruturas são consideradas como planares e de espessura ínfima (planos de falha), no entanto o processo real se apresenta ligeiramente diferente. Este tipo de diferença faz com que diversos fenômenos se manifestem, mas dentre eles, os sedimentos que estão contidos nestas estruturas sofrem compressões e distensões de magnitudes e escalas de tempo variáveis, proporcionando que as respostas acústicas e elásticas desta região sejam muito diferentes, tornando assim uma anomalia.

Pode-se notar que contraste de impedâncias se manifestará devido ao evidente deslocamento relativo entre dos blocos. O mesmo será magnificado e modificado por uma componente desconhecida, gerado pelos sedimentos que podem vir a sofrer transmutações de suas propriedades elásticas e acústicas durante a formação do sistema falhado. Este tipo de fenômeno, que se aproxima à uma singularidade, não possui uma solução simples para os algoritmos de processamento, fazendo-se com que este tipo de fenômeno apresente uma marcação simples e forte. Devido à este fato, os falhamentos são de fácil identificação e classificação em uma seção sísmica (figuras 14 e 15).

4.1.1 IDENTIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE FALHAS

A bacia de Taubaté possui dois grandes grupos de falhas, o primeiro delas possui extensão até o embasamento e apresenta idades que variam desde o Pré-Cambriano até o Eopaleozóico. O segundo grupo de falhas está associado às estruturas de reativação comentadas na seção 2.6. Segundo (MOLINARI, 2003), quatro grupos de lineamentos foram identificados na bacia, sendo os mesmos nomeados da seguinte

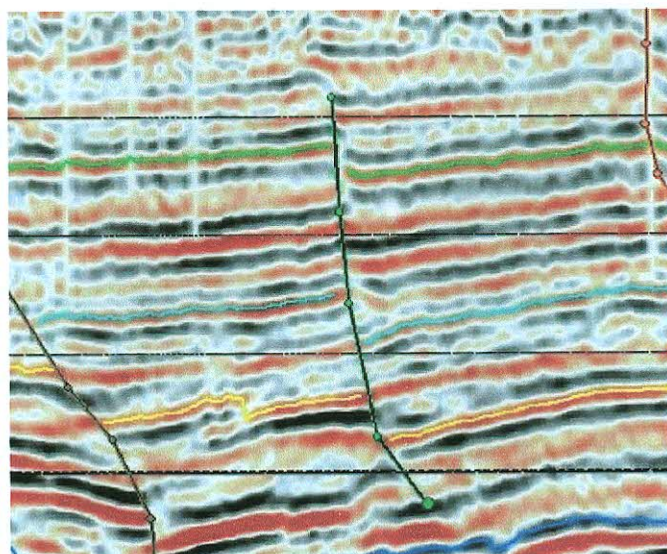


Figura 14: Exemplo de falha normal encontrada na seção sísmica da linha sísmica 10. Retirado de Molinari (2003)

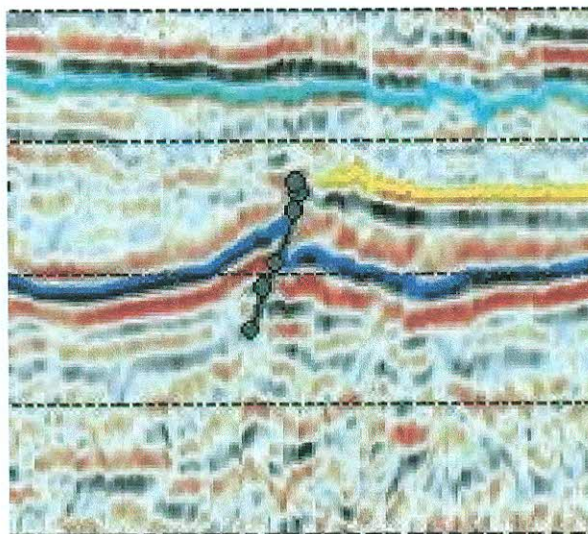


Figura 15: Exemplo de falha reversa encontrada na seção sísmica da linha sísmica 5. Retirado de Molinari (2003)

maneira:

- Sistema de falhas ENE a NO-SE
- Sistema de falhas NNE-SSO
- Sistema de falhas NNO-SSE
- Sistema de falhas ONO-ESE¹

¹O sistema de falhas ONO-ESE, responsável pela segregação da bacia de Taubaté e Resende não fora sondada através de levantamentos sísmicos.

4.1.1.1 Sistema de falhas ENE a NO-SE

Este sistema de lineamentos apresenta orientação concordante com o formato da bacia, na direção da dimensão mais alongada, fazendo parte dos elementos formadores desta configuração, uma vez que as falhas se prolongam até o embasamento. Este conjunto possui elementos diversificados, possuindo falhas das mais diversas classificações: reversas, normais, transcorrentes destrais e sinistrais.

Esse conjunto de falhas, devido aos seus efeitos expressivos, são facilmente perceptíveis em levantamentos sísmicos (figura A.3) assim como em imagens obtidas por satélites (figura 16).

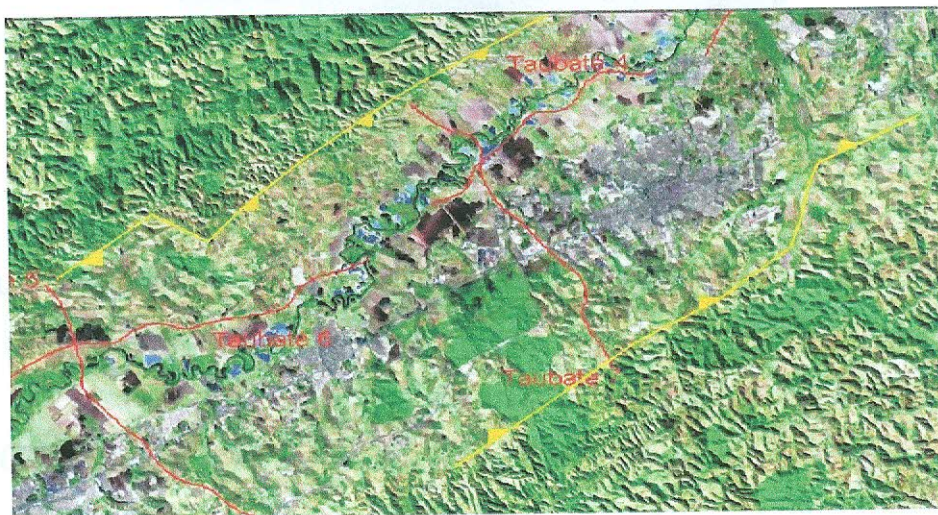


Figura 16: Exibição dos lineamentos de falhas que servem de delimitadores da bacia de Taubaté (amarelo) e a linha sísmica 7 (vermelho) que cruza estes linhamentos. Retirado de Molinari (2003)

4.1.1.2 Sistema de falhas NNE-SSO

Este conjunto de falhamentos é responsável pela compartimentação da bacia, uma vez que o mesmo se apresenta com orientação oblíqua aos eixos principais da bacia. Em sua essência, as falhas normais (figura 14) e reversas (figura 15) são os elementos fundamentais deste conjunto.

4.1.1.3 Sistema de falhas NNO-SSE

Este conjunto de falhas, devido à sua geometria perpendicular ao eixo principal da bacia, se apresenta como o principal evento responsável pela formação das estruturas que segregam a bacia de Taubaté da bacia de São Paulo. O sistema de falhas está associadas a falhas-em-flor (figura 17) tanto positivas quanto negativas.

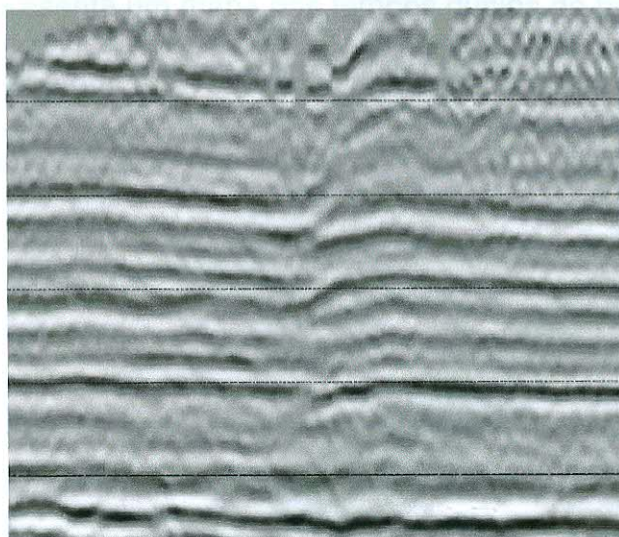


Figura 17: Exemplo de falha-em-flor levantada em uma seção sísmica não interpretada. Retirado de Molinari (2003)

4.1.2 COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL

Durante o processo de marcação dos horizontes de interesse, o intérprete pode produzir um mapa contendo os tempos duplos referentes a um horizonte em particular. Este tipo de mapeamento pode fornecer informações sobre a compartimentação da região de estudo, no caso do horizonte de referência se tratar do embasamento, o intérprete irá tratar da compartimentação atual da região de interesse. Cabe salientar que para a realização desse tipo de referenciamento para tempos diferentes do atual, o intérprete deve realizar o nivelamento dos horizontes que somente fazem ligações com os tratos referentes à superfícies de inundação máxima. Uma vez feito o referenciamento, a resposta a ser obtida, se apresenta conectada com a compartimentação

estrutural da bacia em uma época referente ao horizonte marcado. O mapeamento da evolução da compartimentação² pode ser de grande valia para a inserção de informações sobre a tectonia das regiões adjacentes à região de estudo.

Quando abarcado pelo registro sísmico, o embasamento é de fácil identificação³ para o intérprete devido ao fato desta estrutura propiciar reflexões fortes e bem marcadas. A figura 18 apresenta um mapa dos tempos duplos do horizonte associado ao embasamento. Pode-se notar através deste tipo de mapa que a compartimentação da bacia se torna bastante clara.

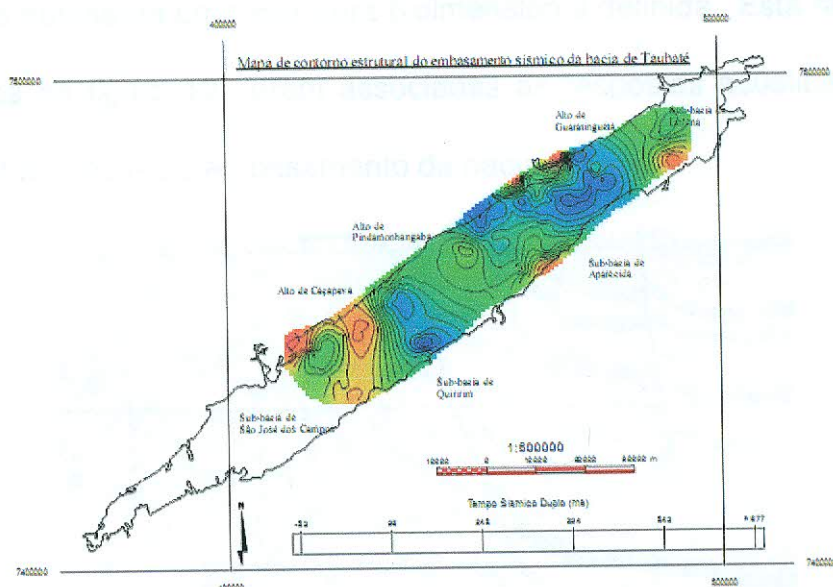


Figura 18: Referenciamento dos tempos duplos da bacia em relação ao embasamento interpretado. Retirado de Molinari (2003).

4.2 Análise Sismoestratigráfica

O método sísmico e outros métodos de obtenção de dados exploratórios de estruturas localizadas em subsuperfície já foram extensamente utilizados para o levantamento das informações estruturais da bacia de Taubaté. Molinari (MOLINARI, 2003) apresenta em seu trabalho uma correlação de padrões reconhecidos nos levantamen-

²Dá-se para esta técnica o nome de *Horizon Slice*.

³Desde que não se encontre em profundidades muito elevadas, devido aos efeitos de divergência esférica e absorção.

tos sísmicos com as descrições faciológicas dos afloramentos que se localizam na bacia. O estudo de Molinari se baseia na metodologia proposta por (Mitchum Jr.; VAIL, 1977) e (Mitchum Jr.; VAIL; SANGREE, 1977).

4.2.1 FÁCIES SÍSMICA A

Região das seções sísmicas que apresenta amplitudes fracas e moderadas, apresentando configuração interna caótica. Nas seções sísmicas levantadas, este tipo de fácies não apresenta correspondência à depósitos sedimentares da bacia de Taubaté, tampouco não apresenta uma estrutura bidimensional definida. Esta fácies, que podem ser vistas na figura 19, foram associadas às respostas acústicas das rochas ígneas ou metamórficas do embasamento da bacia.

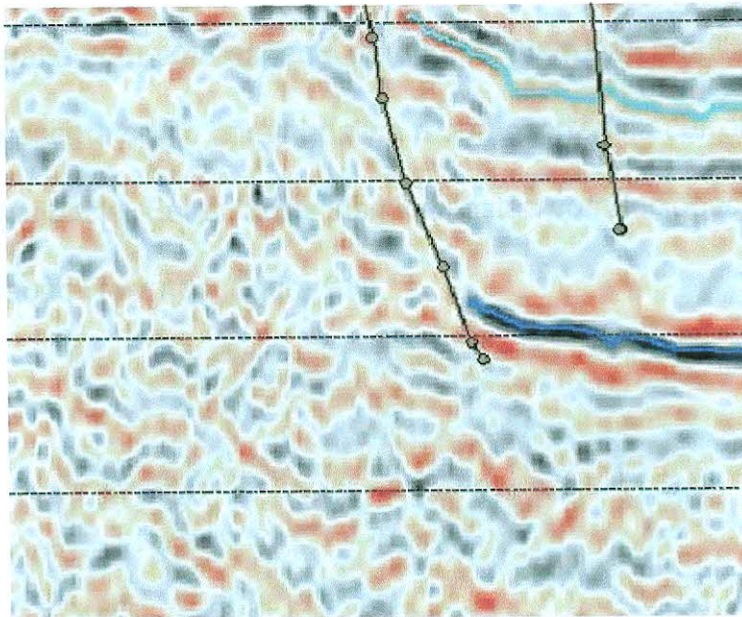


Figura 19: Fácies sísmica A. Retirado de Molinari (2003).

4.2.2 FÁCIES SÍSMICA B

Esta fácies (figura 20) é encontrada na parte superficial de todas as linhas sísmicas levantadas na bacia de Taubaté, apresentando uma possível correlação com os sedimentos oriundos do sistema fluvial meadrante do Rio Paraíba do Sul de maneira na-

tural. As fácies apresentam, no sismograma, um aspecto lenticular com um grau considerável de desordenamento. As reflexões se manifestam com amplitudes variando entre fraca e moderada e com uma razoável extensão lateral.

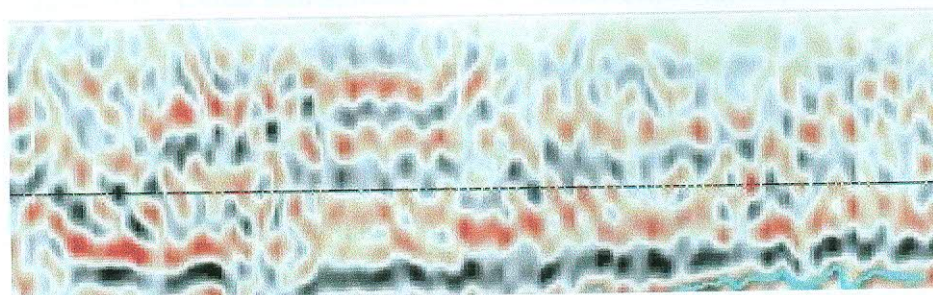


Figura 20: Fácies sísmica B. Retirado de Molinari (2003).

4.2.3 FÁCIES SÍSMICA C

Fácies que apresentam configuração interna caótica/desordenada com pouquíssima continuidade lateral e com uma aspecto de cunha. Além das amplitudes baixas, este tipo de fácies apresenta como característica a sua ocorrência correlacionada com as bordas falhadas da bacia. Estas fácies sísmicas estão correlacionadas com os leques aluviais da Formação Resende (figura 21).

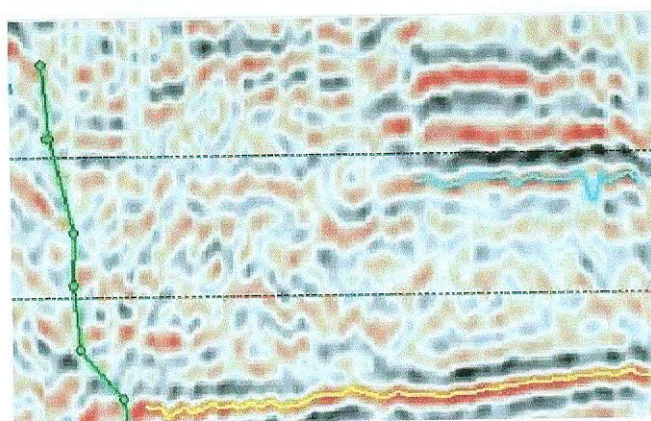


Figura 21: Fácies sísmica C. Retirado de Molinari (2003).

4.2.4 FÁCIES SÍSMICA D

Este tipo de fácies (figura 22) é representado por estruturas que apresentam intercalações plano-paralelas. Estas estratificações são facilmente visíveis devido às marcações fortes e a grande continuidade lateral dos eventos associados a esse tipo de fácies.

Diferentemente das fácies apresentados até este ponto, a fácies D não pode ser utilizada como elemento identificador do ambiente deposicional uma vez que mais de uma solução, apontada para o ambiente fluvial meandrante da Formação Resende, tanto como no sistema fluvial meandrante da Formação Pindamonhangaba assim o sistema lacustre da Formação Tremembé, pois em todos os sistemas supracitados a deposição dos seus sedimentos ocorreu de maneira praticamente uniforme e com uma baixa taxa de subsidência da bacia.

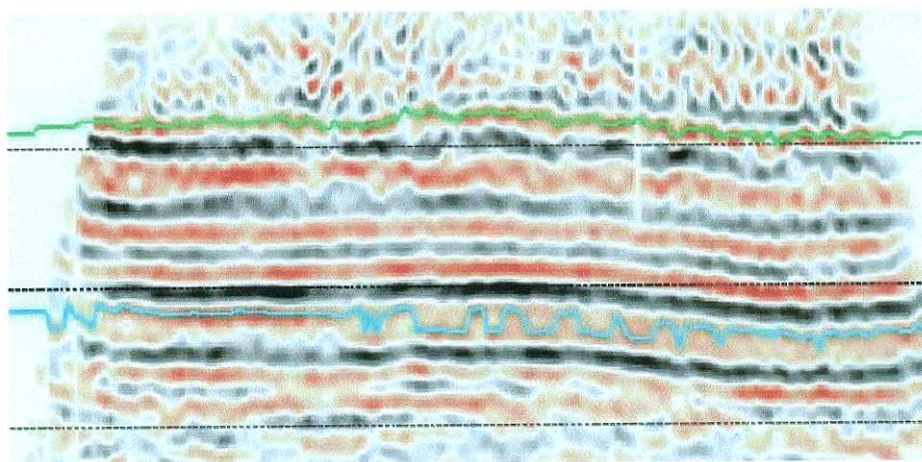


Figura 22: Fácies sísmica D. Retirado de Molinari (2003).

4.2.5 FÁCIES SÍSMICA E

Possuidor de uma forma bidimensional tabular característica, esta fácies (figura 23) se estende por toda a linha sísmica, apresentando reflexões entre moderadas e fortes. Associa-se esta fácies aos arenitos fluviais da Formação Resende.

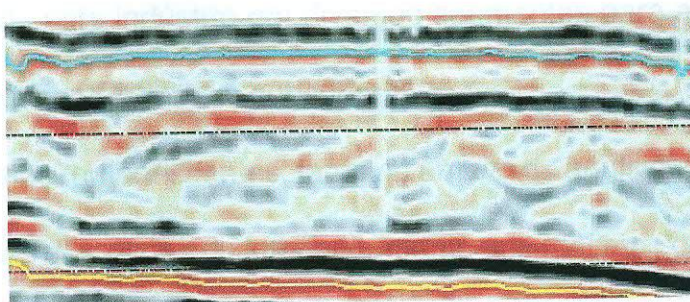


Figura 23: Fácies sísmica E. Retirado de Molinari (2003).

Conclusões

Devido ao amplo, embora incompleto, sucesso da técnica, a sísmica de reflexão é vastamente utilizada pela indústria em diversos segmentos para a compreensão das estruturas e feições localizadas em subsuperfície.

Os problemas remanescentes, tanto no âmbito de aquisição, quanto processamento, interpretação dos dados ou interfaceamento dos mesmos com outras técnicas, exigem conhecimentos avançados nos diversos campos das ciências naturais e exatas, transformando a geofísica em uma ciência de fronteira.

Focalizando a premissa fundamental das definições básicas do termo geofísica, que vislumbra a integração de conhecimentos de geologia, associados à aspectos, tanto teóricos, quanto experimentais, da física e aplicando-os em uma bacia sedimentar, para termos de estudo deste trabalho, pode-se concluir que:

1. *Geologia aplicada à exploração de petróleo*: Área de fundamental necessidade para a execução de tal atividade exploratória, uma vez que somente através da aplicação das informações oriundas desta área de conhecimento, que os processos que propiciaram a formação e/ou caracterizam o sistema petrolífero se tornam passíveis de identificação.
2. *Bacia de Taubaté*: Bacia sedimentar cenozóica do tipo *rift*, de deposição exclusivamente continental, criada por tectonia cisalhante distensiva como alívio de tensão dos processos que propiciaram a ruptura do supercontinente Pangea. Este processo tectônico pode ser dividido em três fases:

(a) Abertura do *rift* (Fase I): Deposição de leques aluviais e lamitos arenosos

na porção central da bacia.

(b) Sistema lacustre (Fase II): Instauração do sistema lacustre de água doce com deposição de folhelhos betuminosos (Formação Tremembé) e arenitos de sistemas fluviais (Formação Resende). Caracterização de ambiente do tipo *playa-lake*.

(c) Assoreamento da bacia (Fase III): Instauração de um sistema fluvial meandrante (Formação Pindamonhangaba), após grande ressecção do lago (caracterizado por grandes depósitos de calcário), que perdura até hoje (Depósitos quartenários).

Esta proposta não se encaixa perfeitamente na tectonia da bacia por não contemplar as ocorrências dos depósitos das formações São Paulo e Itaquaquecetuba.

3. *Perspectiva exploratória da bacia de Taubaté*: Embora a bacia de Taubaté, em termos de sistemas petrolíferos clássicos, seja imatura, a exploração de óleo na bacia não deve ser totalmente descartada. É recomendável que o volume de óleo recuperável, apresentado por (ABREU, 1962), seja confirmado e que novos estudos sobre viabilidade técnica da extração deste óleo sejam realizados, uma vez que o preço do barril de petróleo tende a subir ainda mais.

4. *Aquisição sísmica*: Área fomentadora de dados sísmicos. Através dela que são estabelecidas as faixas de resolução e velocidade de levantamento dos dados.

Pode-se comentar que:

(a) O aumento de geofones ativos nos afastamentos mais longos pode maximizar a relação sinal/ruído.

5. *Processamento sísmico*: Etapa responsável pelo tratamento dos dados, reduzindo ou eliminando todos os efeitos indesejáveis conhecidos ou modeláveis. Dentro desta área cabe salientar que:

- (a) Análise de velocidades e Atenuação de múltiplas constituem os dois maiores problemas da geofísica contemporânea devido à natural recursividade que estes processos induzem mutuamente.
- (b) O sinal das múltiplas, filtrado pelos filtros F-K ou Radon podem ser utilizados para amplificar o sinal dos refletores e propiciar reduções extra dos ruídos.
- (c) O fenômeno de estiramento pode ser parcialmente explicado pelo início da inadequação da aproximação de Terra plana. Frequências de amostragem maiores para afastamentos mais longos podem reduzir este tipo de problema.
- (d) Investigação sobre a redução de efeitos de estiramento podem dar nova luz sobre a compreensão das anomalias de AVO para eventos rasos.

Referências Bibliográficas

- ABREU, S. F. *Recursos Minerais do Brasil, Vol. 2 - Combustíveis fósseis e minérios metálicos*. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 1962.
- ALMEIDA, F. F. M. Considerações sobre a geomorfogênese da serra de cubatão. *Boletim Paulista de Geografia*, São Paulo, v. 15, p. 3–17, 1953.
- ALMEIDA, F. F. M. As camadas de são paulo e a tectônica da serra da cantareira. *Boletim Sociedade Brasileira de Geologia*, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 23–40, 1955.
- ALMEIDA, F. F. M. The system of continental rift bordering the santos basin, brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 48, n. (supl), p. 15–26, 1976.
- AMADOR, E. S. Estratigrafia e sedimentação da bacia de resende - rj. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 45, p. 181–223, 1975.
- APPI, C. J. *et al.* Faciologia e estratigrafia da bacia de taubaté. relatório interno cenpes. (inédito). 1986.
- CAMPANHA, V. A. *A arquitetura deposicional da bacia sedimentar de Taubaté, SP como subsídio à delimitação das zonas de produção mineral*. 193 p. Tese (Doutorado), 1994.
- CARNEIRO, C. *et al.* Estrutura da bacia de taubaté na região de são josé dos campos. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia*. Ouro Preto, 1976. v. 4, n. 29, p. 247–256.

CHANG, H. K. *et al.* Geologia da bacia de taubaté. In: *Simpósio de Geologia do Sudeste*. Rio de Janeiro: SBG, 1989. v. 1, p. 10.

COIMBRA, A. M. *et al.* A formação itaquaquecetuba: Evidências de tectonismo no quartenário paulista. In: *4º Simpósio Regional de Geologia*. São Paulo: SBG/Núcleo São Paulo, 1983. p. 253–266.

FERNANDES, F. L. *Arcabouço Estrutural e Evolução da Bacia de Taubaté - SP*. Dissertação (Mestrado), 1993.

FREITAS, E. L.; APPI, C. J. Evento de ressecção (caliche): um marco estratigráfico do terciário das bacias de taubaté e resende. In: *Simpósio de Geologia Regional*. Rio Claro: SBG/Núcleo São Paulo, 1987. v. 6, p. 323–337.

JACKSON, J. D. *Classical Electrodynamics*. New York: Academic Press, 2007.

LIMA, M. R.; AMADOR, E. S. Análise palinológica de sedimentos da formação resende, terciário do estado do rio de janeiro, brasil. In: *Coletânea de trabalhos paleontológicos*. Brasília: DNPM, 1985. p. 371–378.

MAGOON, L. B.; DOW, W. G. The petroleum system - from source to trap. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, Rio de Janeiro, v. 60, p. 3–24, 2004.

MARQUES, A. Evolução tectono-sedimentar e perspectivas exploratórias da bacia de taubaté, são paulo, brasil. *Boletim de Geociências PETROBRAS*, Rio de Janeiro, v. 4, n. 3, p. 253–262, 1990.

MILANI, E. J. *et al.* Petróleo na margem continental brasileira: Geologia, exploração , resultados e perspectivas. *Brazilian Journal of Geophysics*, Rio de Janeiro, v. 18, n. 3, p. 351–396, 2000.

Mitchum Jr., R. M.; VAIL, P. R. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 7: Stratigraphic interpretation procedure. In: PAYTON, C. (Ed.). *Seismic Stratigraphy - Applications to Hydrocarbon Exploration*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1977. v. 26, p. 135–143.

Mitchum Jr., R. M.; VAIL, P. R.; SANGREE, J. B. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: PAYTON, C. (Ed.). *Seismic Stratigraphy - Applications to Hydrocarbon Exploration*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1977. v. 26, p. 117–133.

MOLINARI, L. *Interpetração Sismoestratigráfica da bacia de Taubaté*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso), 2003.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. *Portal Br*. <http://www.br.com.br>, 2002.

RIBEIRO, M. T. *Fácies microclásticas de um sistema lacustre oligocênico do sudeste do Brasil (Formação Tremembé, bacia de Taubaté)*. Dissertação (Mestrado), 2004.

RICCOMINI, C. *O Rift Continental do Sudeste Brasileiro*. 256 p. Tese (Doutorado), 1989.

RICCOMINI, C. *et al.* Tectônica e sedimentação no sistema de rifts continentais da serra do mar (bacias de volta redonda, resende, taubaté e são paulo). In: *Simpósio de Geologia RJ-ES*. Rio de Janeiro, Anais: SBG/Núcleo Rio de Janeiro e Espírito Santo, 1987. v. 1, p. 253–298.

ROSA, A. L. R. *Análise do Sinal Sísmico*. Rio de Janeiro: PETROBRAS - Material Interno, 2007.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIF, R. E. *Applied Geophysics*. New York: Cambridge University Press, 1990.

VESPUCCI, J. B. O. *Sistemas deposicionais e evolução tectono-sedimentar da Bacia de Taubaté, SP*. 89 p. Dissertação (Mestrado), 1984.

VESPUCCI, J. B. O. Sistemas deposicionais e evolução tectono-sedimentar da bacia de taubaté, sp. *Rev. Bras. de Geociências*, Rio de Janeiro, v. 15, n. (1), 1985.

YILMAZ Öz. *Seismic Data Analysis*. Tulsa: Society of Exploration in Geophysicists, 2001.

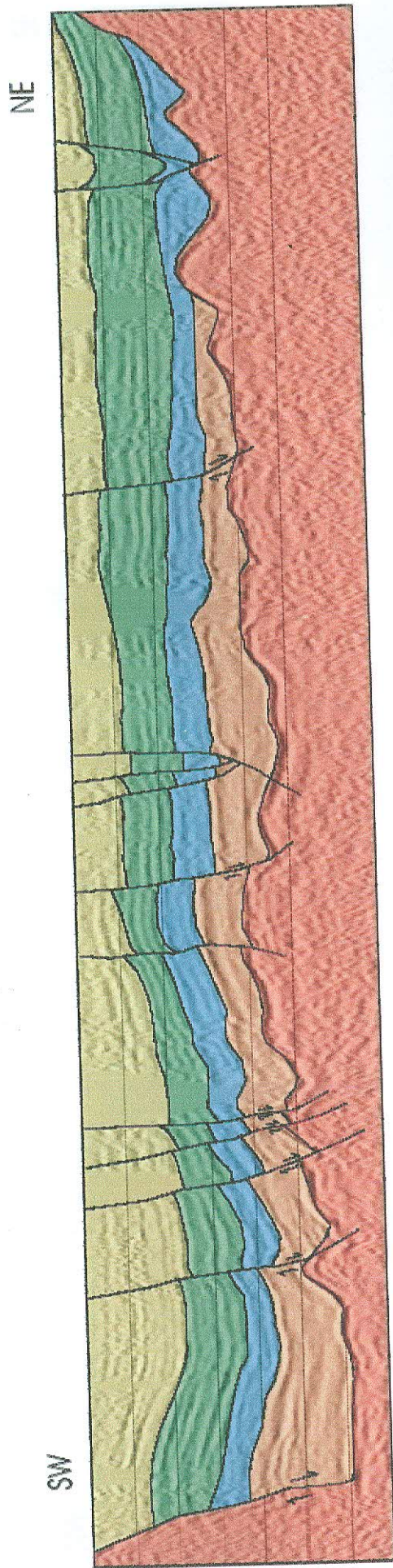
A DADOS REAIS



Figura A.1.1. (a) Dados reais de uma única amostra.



Figura A.1.1. (a) Dados reais de uma única amostra. (b) Dados reais de uma amostra com 1000 observações.



Comprimento da linha = 17 400 m

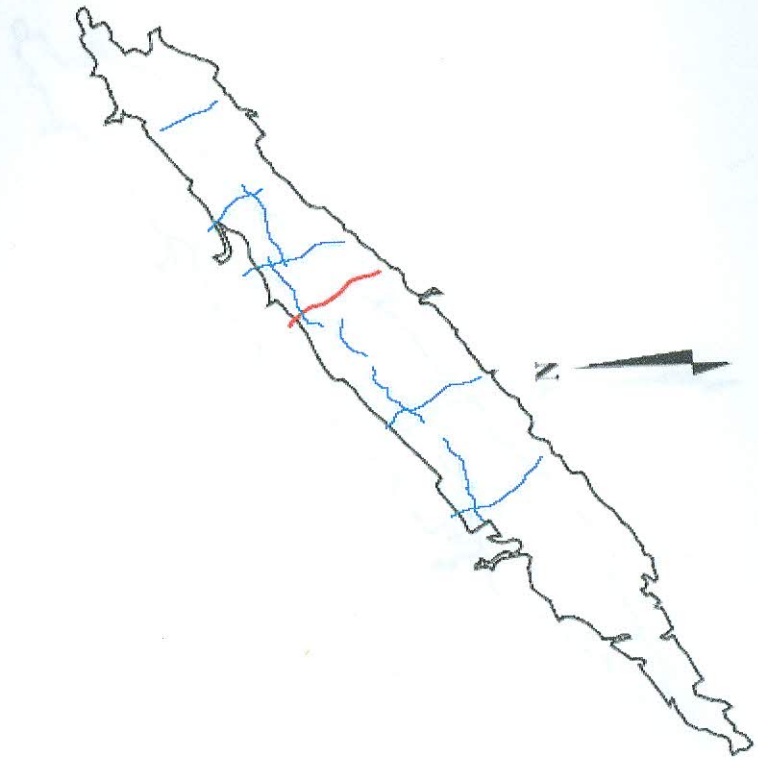
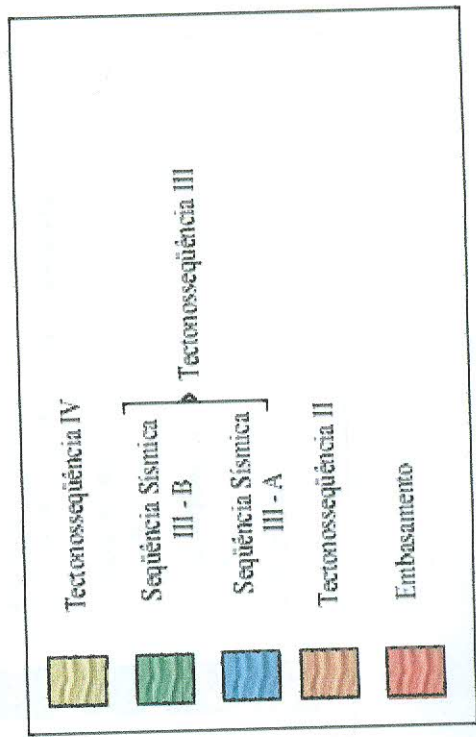


Figura A.1: Seção sísmica processada e interpretada referente à linha sísmica 3. Retirado de Molinari (2003)

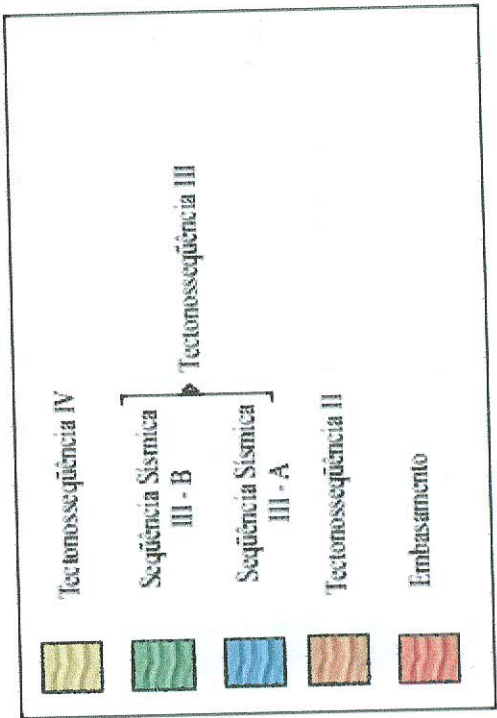
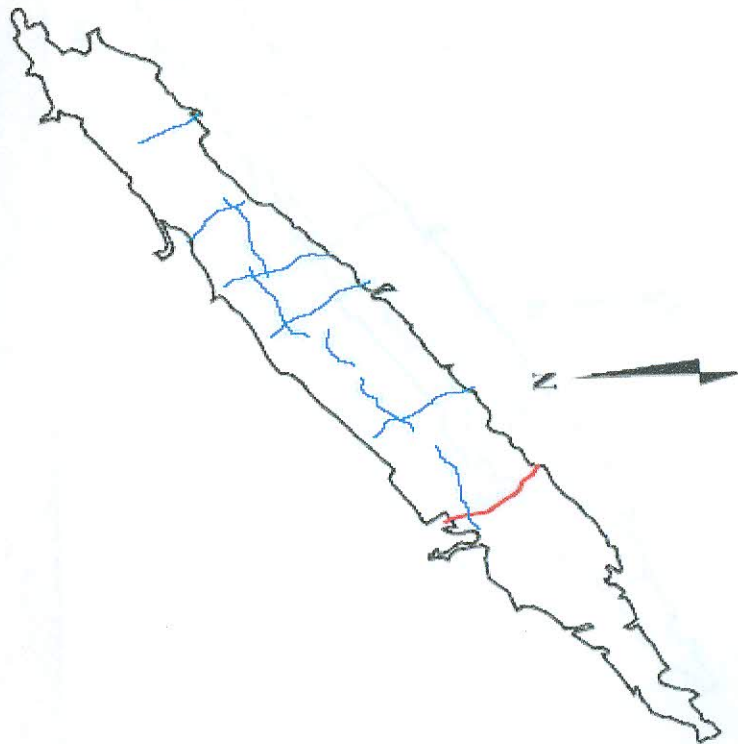
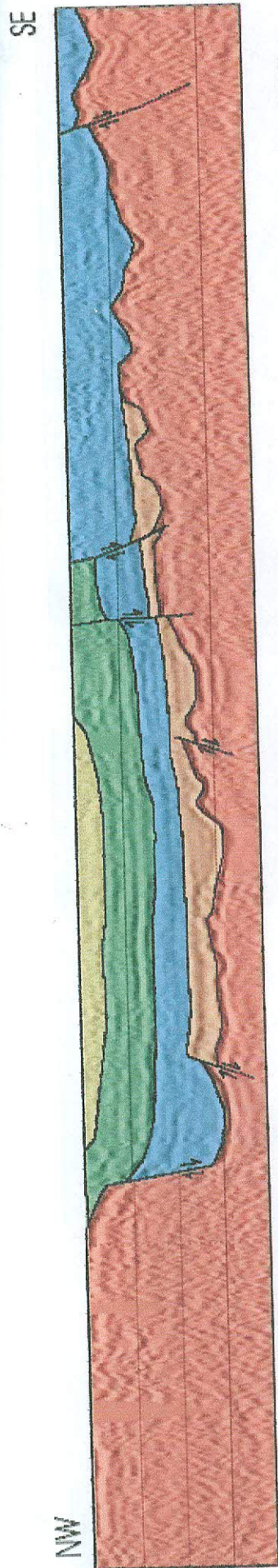
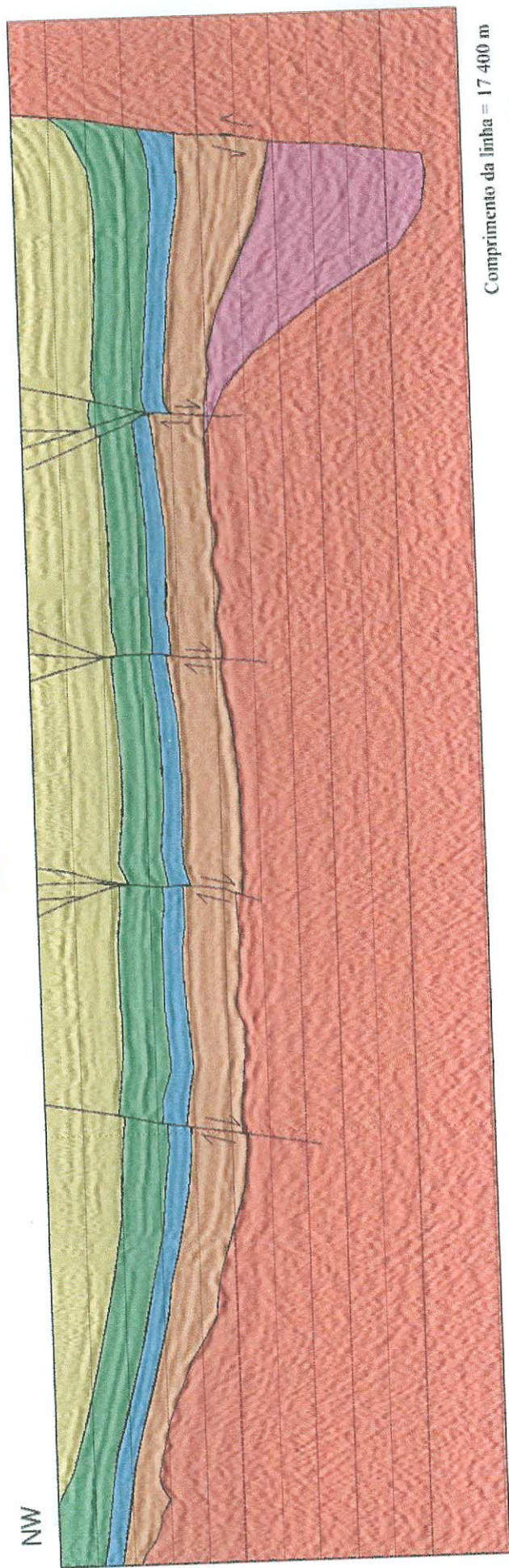


Figura A.2: Seção sísmica processada e interpretada referente à linha sísmica 5. Retirado de Molinari (2003)

SE

NW



Comprimento da linha = 17 400 m

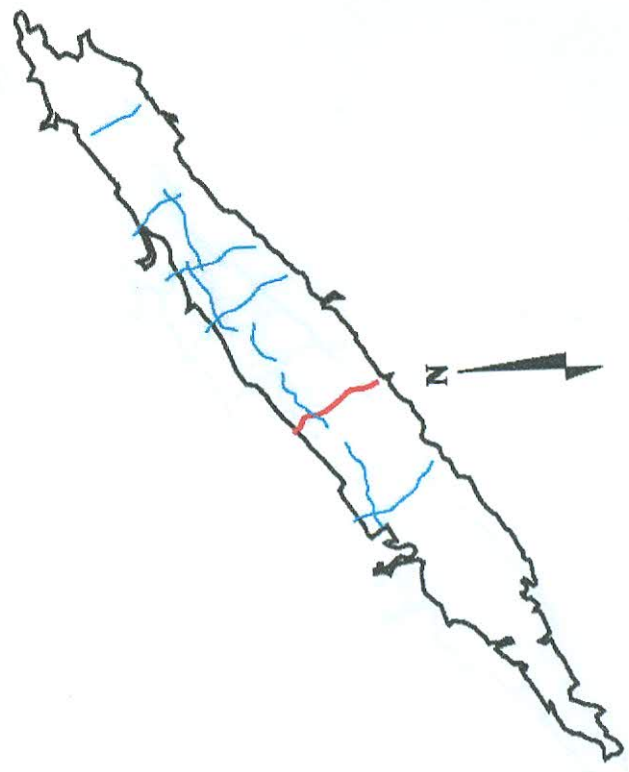
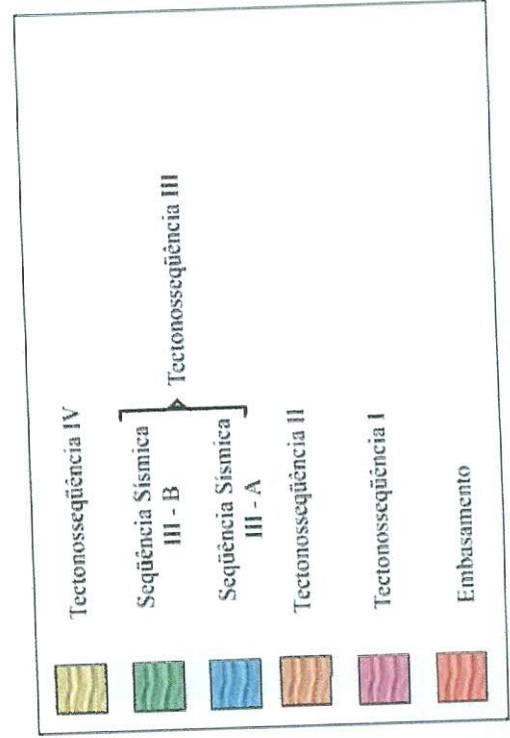


Figura A.3: Seção sísmica processada e interpretada referente à linha sísmica 7. Retirado de Molinari (2003)

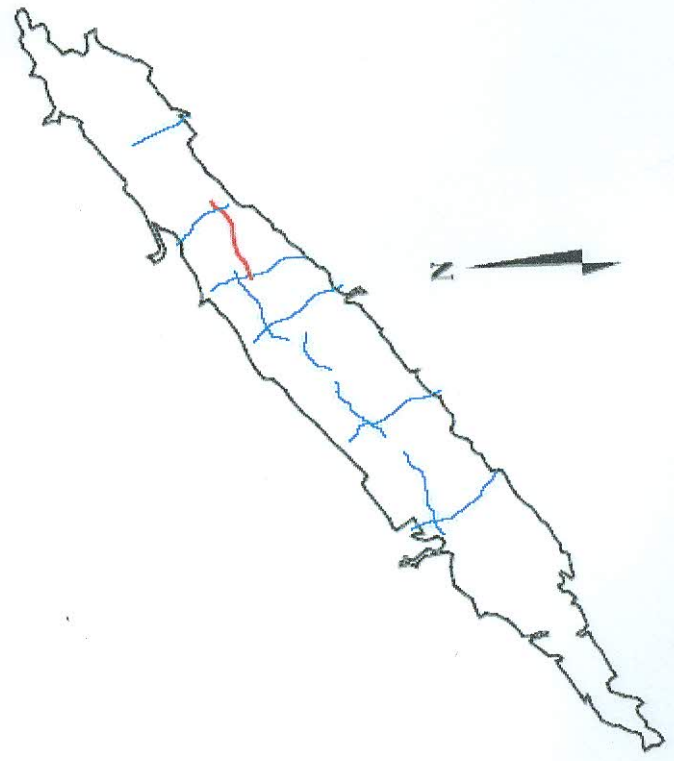
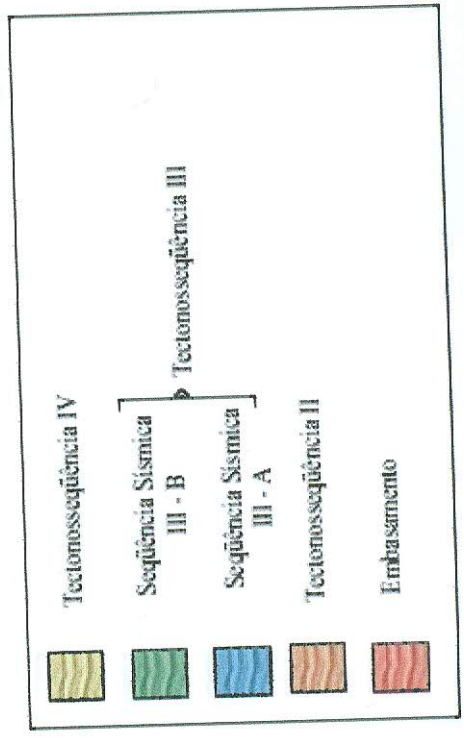


Figura A.4: Seção sísmica processada e interpretada referente à linha sísmica 8. Retirado de Molinari (2003)

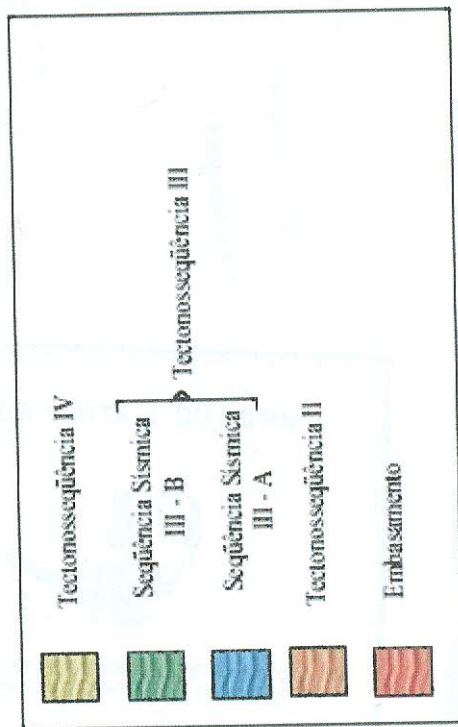
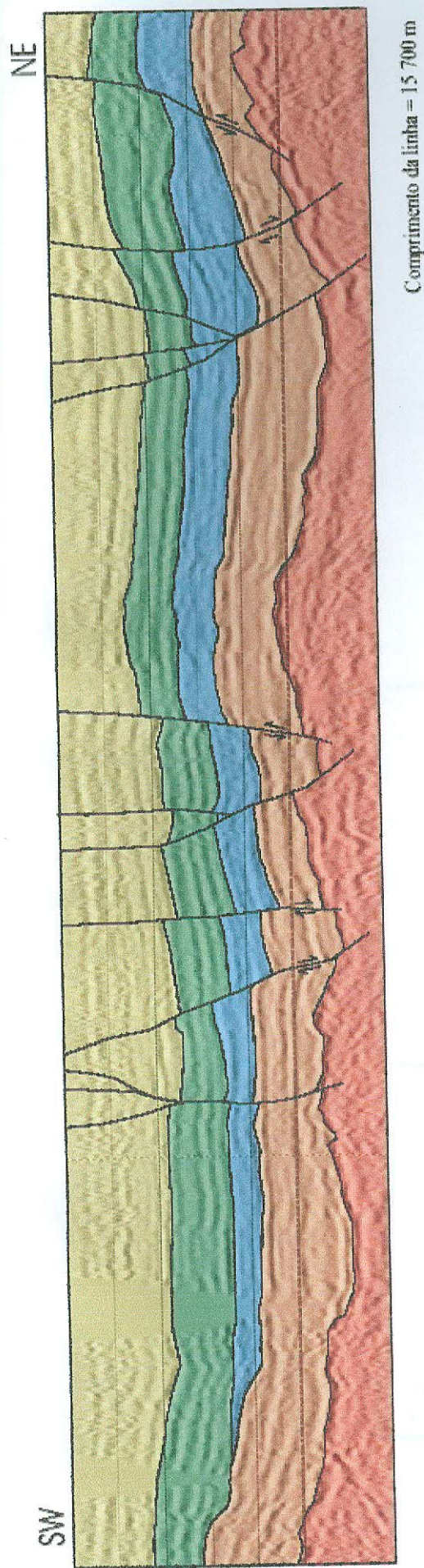


Figura A.5: Seção sísmica processada e interpretada referente à linha sísmica 10. Retirado de Molinari (2003)